

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**TESIS**

**“ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL RÍO  
CHONTA MEDIANTE LA TÉCNICA SOFISTICADA DE  
VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS A GRAN  
ESCALA (LSPIV), DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA, PROVINCIA DE  
CAJAMARCA EN EL AÑO 2023”**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
INGENIERO HIDRÁULICO**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. FLORES VARGAS JEINER MICHEL**

**ASESOR:**

**Dr. Ing. VÁSQUEZ RAMÍREZ LUIS**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2024**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA

1. Investigador: JEINER MICHEL FLORES VARGAS  
DNI: 73124664  
Escuela Profesional: INGENIERÍA HIDRAULICA
2. Asesor: LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ  
Facultad: INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: "ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL RÍO CHONTA MEDIANTE LA TÉCNICA SOFISTICADA DE VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA (LSPIV), DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA EN EL AÑO 2023"
6. Fecha de evaluación: 13/05/2025
7. Software antiplagio:       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 17%
9. Código Documento: oid: 3117:458982112
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 13/05/2025

 <hr/> <p><b>FIRMA DEL ASESOR</b> Nombres y Apellidos <b>LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ</b> DNI: 26693344</p>	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 13/05/2025 22:33:50-0500</p> <hr/> <p><b>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</b></p>
---	--



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.**

TITULO : ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL RÍO CHONTA MEDIANTE LA TÉCNICA SOFISTICADA DE VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA (LSPIV), DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA EN EL AÑO 2023.

ASESOR : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0334-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 23 de junio de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **cuatro días del mes de julio de 2025**, siendo las dieciséis horas con treinta minutos (4:30 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la facultad de Ingeniería, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

- Presidente : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Vocal : Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Secretario : M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL RÍO CHONTA MEDIANTE LA TÉCNICA SOFISTICADA DE VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA (LSPIV), DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA EN EL AÑO 2023, presentado por el Bachiller en Ingeniería Hidráulica JEINER MICHEL FLORES VARGAS, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS DIECIOCHO (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de DIECIOCHO... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 5:15 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Presidente

Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Vocal

M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios por bendecirme con la vida y la salud a lo largo de mi formación profesional.*

*A mis padres por su apoyo constante que ha sido el motor para alcanzar cada uno de mis objetivos y metas.*

*Al Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez, por brindarme su valioso tiempo y orientación, los mismos que contribuyeron al éxito de este trabajo de investigación.*

## DEDICATORIA

*La presente investigación va dedicada con amor y cariño a mis padres por guiarme y ser el soporte incondicional para alcanzar mis metas trazadas.*

*A mi abuelo Mario Mercedes Flores Chilón, quien siempre creyó en mí y cuyo recuerdo ha sido una fuente constante de fuerza e inspiración para culminar esta investigación.*

*A mis docentes, por impartirme su conocimiento y contribuir a mi formación tanto profesional como personal.*

*A mis amigos, quienes han sido apoyo esencial para terminar con éxito esta tesis.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.1. Contextualización del problema.....	3
1.1.2. Descripción del problema .....	3
1.1.3. Formulación del problema .....	4
1.2. Hipótesis de la investigación .....	4
1.3. Justificación de la investigación .....	4
1.3.1. Justificación científica.....	4
1.3.2. Justificación técnica-práctica .....	4
1.3.3. Justificación institucional y personal .....	5
1.4. Delimitación de la investigación.....	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo general.....	6
1.5.2. Objetivos específicos .....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Antecedentes teóricos de la investigación .....	7
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	7
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	9
2.2. Bases teóricas.....	9
2.2.1. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) .....	9
2.2.2. RIVeR .....	12
2.2.3. PIVlab .....	19

2.2.4. Procesamiento de imágenes .....	21
2.2.5. Evaluación de imágenes .....	22
2.2.6. Postprocesamiento.....	23
2.2.7. Fuentes de error en LSPIV .....	23
2.2.8. Velocidad superficial .....	28
2.2.9. Instrumentos de monitoreo fluvial .....	35
2.2.10. Error estadístico .....	48
2.2.11. Modelos de distribución.....	49
3.1. Definición de términos básicos.....	56
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	57
3.2. Ubicación de la zona de estudio .....	57
3.2.1. Ubicación geográfica .....	57
3.2.2. Ubicación política .....	61
3.3. Materiales y equipos .....	63
3.3.1. Materiales.....	63
3.3.2. Equipos.....	63
3.4. Metodología.....	65
3.5. Procedimiento .....	66
3.5.1. Primera etapa: Adquisición de datos y trabajo preparatorio .....	66
3.5.2. Segunda etapa: Preprocesamiento de imágenes.....	70
3.5.3. Tercera etapa: Evaluación de imágenes .....	72
3.5.4. Cuarta etapa: Postprocesamiento .....	73
3.7. Procesamiento de imágenes de las secciones del Río Chonta con RIVeR y PIVlab.....	75
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	97
4.1. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) primera campaña .....	97
4.1.1. Resultados de la medición del 14 de octubre de 2023 .....	97
4.1.2. Resultados de la medición del 15 de octubre de 2023 .....	99

4.1.3. Resultados de la medición del 16 de octubre de 2023 .....	101
4.1.4. Resultados de la medición del 17 de octubre de 2023 .....	103
4.2. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) segunda campaña.....	105
4.2.1. Resultados de la medición del 11 de noviembre de 2023 .....	105
4.2.2. Resultados de la medición del 12 de noviembre de 2023 .....	107
4.2.3. Resultados de la medición del 13 de noviembre de 2023 .....	109
4.2.4. Resultados de la medición del 14 de noviembre de 2023 .....	111
4.3. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) tercera campaña.....	113
4.3.1. Resultados de la medición del 16 de diciembre de 2023 .....	113
4.3.2. Resultados de la medición del 17 de diciembre de 2023 .....	115
4.3.3. Resultados de la medición del 18 de diciembre de 2023 .....	117
4.3.4. Resultados de la medición del 19 de diciembre de 2023 .....	119
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
5.1. Conclusiones.....	124
5.2. Recomendaciones .....	125
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	126
BIBLIOGRAFÍA .....	126
LINKOGRAFÍA .....	127
ANEXOS .....	131

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Valores críticos para la prueba Kolmogorov – Smirnov .....	55
<b>Tabla 2</b> Coordenadas de los puntos de medición mediante el método LSPIV en un tramo de 3 km del río Chonta.....	57
<b>Tabla 3</b> Especificaciones del Dji Phantom 4 Pro RTK.....	63
<b>Tabla 4</b> Especificaciones del Dji Mavic Air 2 .....	64
<b>Tabla 5</b> Data de campo en las diferentes campañas de medición. ....	69
<b>Tabla 6</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 14-10-23. ....	98
<b>Tabla 7</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 14-10-23. ....	98
<b>Tabla 8</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 15-10-23. ....	100
<b>Tabla 9</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 15-10-23.....	100
<b>Tabla 10</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 16-10-23. ....	102
<b>Tabla 11</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 16-10-23. ....	102
<b>Tabla 12</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 17-10-23. ....	104
<b>Tabla 13</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 17-10-23. ....	104
<b>Tabla 14</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 11-11-23. ....	106
<b>Tabla 15</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 11-11-23. ....	106
<b>Tabla 16</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 12-11-23. ....	108
<b>Tabla 17</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 12-11-23. ....	108
<b>Tabla 18</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 13-11-23. ....	110

<b>Tabla 19</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 13-11-23. ....	110
<b>Tabla 20</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 14-11-23. ....	112
<b>Tabla 21</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 14-11-23. ....	112
<b>Tabla 22</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 16-12-23. ....	114
<b>Tabla 23</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 16-12-23. ....	115
<b>Tabla 24</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 17-12-23. ....	116
<b>Tabla 25</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 17-12-23. ....	116
<b>Tabla 26</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 18-12-23. ....	118
<b>Tabla 27</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 18-12-23. ....	118
<b>Tabla 28</b> Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 19-12-23. ....	120
<b>Tabla 29</b> Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 19-12-23. ....	120
<b>Tabla 30</b> Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Error Medio Absoluto Porcentual (MAPE). ....	122
<b>Tabla 31</b> Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Error Medio Absoluto (MAE). ....	122
<b>Tabla 32</b> Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Raíz del Error Cuadrático Medio Relativo (R-RMSE). ....	123
<b>Tabla 33</b> Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la primera campaña de medición, 14 de octubre de 2023. ....	133
<b>Tabla 34</b> Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la primera campaña de medición, 15 de octubre de 2023. ....	134
<b>Tabla 35</b> Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la primera campaña de medición, 16 de octubre de 2023. ....	135

<b>Tabla 36</b> Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la primera campaña de medición, 17 de octubre de 2023. ....	136
<b>Tabla 37</b> Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la segunda campaña de medición, 11 de noviembre de 2023. ....	137
<b>Tabla 38</b> Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la segunda campaña de medición, 12 de noviembre de 2023. ....	138
<b>Tabla 39</b> Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la segunda campaña de medición, 13 de noviembre de 2023. ....	139
<b>Tabla 40</b> Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la segunda campaña de medición, 14 de noviembre de 2023. ....	140
<b>Tabla 41</b> Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la tercera campaña de medición, 16 de diciembre de 2023. ....	141
<b>Tabla 42</b> Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la tercera campaña de medición, 17 de diciembre de 2023. ....	142
<b>Tabla 43</b> Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la tercera campaña de medición, 18 de diciembre de 2023. ....	143
<b>Tabla 44</b> Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la tercera campaña de medición, 19 de diciembre de 2023. ....	144

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esquemas de (a) una implementación LSPIV fija tradicional y (b) la configuración LSPIV basada en imágenes aéreas.....	10
<b>Figura 2</b> Diagrama de flujo del sistema de análisis a gran escala. Los módulos en azul forman parte de la caja de herramientas RIVeR.....	13
<b>Figura 3</b> Ventana del módulo de interfaz de RIVeR para la extracción de imágenes. ....	14
<b>Figura 4</b> Diagrama de flujo de las subsecuencias clásicas de tratamiento de imágenes con PIVlab o PTVlab.....	15
<b>Figura 5</b> Interfaz de RIVeR donde se definen los puntos de control visibles y sus respectivas distancias.....	18
<b>Figura 6</b> Resultados de rectificaciones del análisis LSPIV utilizando RIVeR. ....	19
<b>Figura 7</b> Diagrama de flujo de la arquitectura de PIVlab. ....	20
<b>Figura 8</b> Conceptualización del algoritmo de tratamiento de imágenes LSPIV (los patrones de las imágenes suelen estar formados por partículas más pequeñas de la misma naturaleza, es decir, espuma, hojas o semillas artificiales añadidas a la superficie para recoger las mediciones). ....	22
<b>Figura 9</b> Procedimiento general de corrección de vectores erróneos. ....	23
<b>Figura 10</b> Distancia de muestreo del suelo. ....	25
<b>Figura 11</b> Relación entre la cámara y el sistema coordinado del terreno. (a) Coordenadas reales (X, Y, Z) y (b) coordenadas sobre la imagen (u, v).....	26
<b>Figura 12</b> Variación de las velocidades del agua en una sección transversal del cauce, y cálculo de la velocidad media.....	28
<b>Figura 13</b> Distribución de velocidades en un canal rectangular. ....	30
<b>Figura 14</b> Curva típica de velocidad vertical. ....	30
<b>Figura 15</b> Vista de una sección transversal de un río, en la que figura la posición de los puntos de observación. ....	31
<b>Figura 16</b> Medición del nivel de agua en un río mediante una estación limnimétrica. ....	32
<b>Figura 17</b> Tipos de ríos de acuerdo con su geometría. ....	33
<b>Figura 18</b> Tipos de ríos de acuerdo con el caudal y el material transportado.....	34
<b>Figura 19</b> Formas del lecho en ríos arenosos.....	35
<b>Figura 20</b> Medición de la velocidad superficial del agua con el método del flotador.....	36
<b>Figura 21</b> Correntómetro Digital Global FP111 Flow Probe Current Meter forma parte de la destacada línea de productos Global Water, bajo la reconocida marca Xylem. ....	38

<b>Figura 22</b> ADV SonTek de 10 MHz.....	41
<b>Figura 23</b> Desplazamiento Doppler: el efecto Doppler es un suceso que implica un desplazamiento de frecuencia. El supuesto cambio aparente en la frecuencia de las ondas sonoras se origina debido a la reflexión de estas por partículas en movimiento. ....	42
<b>Figura 24</b> Aforo con ADCP M-9 desde embarcación con motor fuera de borda en el río Piura. ....	43
<b>Figura 25</b> Pantalla gráfica de visualización de resultados del aforo con ADCP M-9 en el río Piura. ....	44
<b>Figura 26</b> Regiones hidrológicas del Perú donde el SENAMHI realiza aforos con diferentes equipos ADCP. ....	46
<b>Figura 27</b> Esquema del principio de funcionamiento del radar de velocidad.....	47
<b>Figura 28</b> Ubicación de los puntos de medición, 1 y 2 en el tramo seleccionado del río Chonta. ....	58
<b>Figura 29</b> Ubicación de los puntos de medición, 3 y 4 en el tramo seleccionado del río Chonta. ....	59
<b>Figura 30</b> Mapa de Localización de la Cuenca del Río Chonta, con énfasis en la trayectoria del río Chonta como componente central del estudio.....	60
<b>Figura 31</b> Ubicación política de la zona de estudio.....	62
<b>Figura 32</b> Flujo de trabajo LSPIV para la adquisición de datos y trabajo preparatorio, etapa 1. ....	67
<b>Figura 33</b> Flujo de trabajo LSPIV para el preprocesamiento de imágenes, etapa 2. ....	71
<b>Figura 34</b> Flujo de trabajo LSPIV para evaluación de imágenes, etapa 3.....	73
<b>Figura 35</b> Flujo de trabajo LSPIV para el postprocesamiento, etapa 4. ....	74
<b>Figura 36</b> Proceso de extracción de imágenes con la interfaz de RIVeR. ....	76
<b>Figura 37</b> Interfaz gráfica de PIVlab. ....	77
<b>Figura 38</b> Ventana gráfica de PIVlab para la carga de imágenes a procesar.....	78
<b>Figura 39</b> Interfaz gráfica de PIVlab con imágenes cargadas para su procesamiento.....	79
<b>Figura 40</b> Ventana de selección de una región de interés y una mascara para el análisis PIV. ....	80
<b>Figura 41</b> Ventana gráfica para mejorar el contraste de las imágenes para el análisis PIV. ..	82
<b>Figura 42</b> Ventana de selección de algoritmo PIV y establecimiento de ventana de interrogación. ....	83
<b>Figura 43</b> Ventana para analizar el conjunto de imágenes. ....	83
<b>Figura 44</b> Ventada para definir las velocidades límite. ....	84

<b>Figura 45</b>	Campo vectorial medio del conjunto de imágenes.....	85
<b>Figura 46</b>	Proceso para cargar la sesión de PIVlab. ....	87
<b>Figura 47</b>	Proceso para la elección de la imagen de fondo rectificadas.....	87
<b>Figura 48</b>	Proceso para la elección de la imagen donde sean visibles los puntos de control. ....	88
<b>Figura 49</b>	Proceso para la definición de los puntos de control para la ortorectificación de las imágenes analizadas.....	88
<b>Figura 50</b>	Definición de las distancias entre los puntos de control. ....	89
<b>Figura 51</b>	Definición de la sección de interés para el análisis y ortorectificación de las imágenes. ....	90
<b>Figura 52</b>	Paso de tiempo sugerido para el tratamiento del conjunto de imágenes.....	91
<b>Figura 53</b>	Proceso para la rectificación de resultados.....	91
<b>Figura 54</b>	En la ventana de la margen derecha se observa los resultados rectificados.....	92
<b>Figura 55</b>	Recomendación para la definición de la sección transversal. ....	93
<b>Figura 56</b>	Sección transversal definida para la determinación de la velocidad superficial. ...	94
<b>Figura 57</b>	Proceso para la obtención de los resultados de la velocidad superficial en la sección anteriormente definida. ....	95
<b>Figura 58</b>	Distribución de velocidades de la sección definida.....	95
<b>Figura 59</b>	Perfil de velocidades de la sección definida.....	96
<b>Figura 60</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 14-10-23.....	99
<b>Figura 61</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 15-10-23.....	101
<b>Figura 62</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 16-10-23.....	103
<b>Figura 63</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 17-10-23.....	105
<b>Figura 64</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 11-11-23.....	107
<b>Figura 65</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 12-11-23.....	109
<b>Figura 66</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 13-11-23.....	111
<b>Figura 67</b>	Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 14-11-23.....	113

<b>Figura 68</b> Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 16-12-23.....	115
<b>Figura 69</b> Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 17-12-23.....	117
<b>Figura 70</b> Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 18-12-23.....	119
<b>Figura 71</b> Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 19-12-23.....	121
<b>Figura 72</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la primera campaña de medición, 14 de octubre de 2023. ....	133
<b>Figura 73</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la primera campaña de medición, 15 de octubre de 2023. ....	134
<b>Figura 74</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la primera campaña de medición, 16 de octubre de 2023. ....	135
<b>Figura 75</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la primera campaña de medición, 17 de octubre de 2023. ....	136
<b>Figura 76</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la segunda campaña de medición, 11 de noviembre de 2023. ....	137
<b>Figura 77</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la segunda campaña de medición, 12 de noviembre de 2023. ....	138
<b>Figura 78</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la segunda campaña de medición, 13 de noviembre de 2023. ....	139
<b>Figura 79</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la segunda campaña de medición, 14 de noviembre de 2023. ....	140
<b>Figura 80</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la tercera campaña de medición, 16 de diciembre de 2023. ....	142
<b>Figura 81</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la tercera campaña de medición, 17 de diciembre de 2023. ....	143
<b>Figura 82</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la tercera campaña de medición, 18 de diciembre de 2023. ....	144
<b>Figura 83</b> Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la tercera campaña de medición, 19 de diciembre de 2023. ....	145

<b>Figura 84</b> Medición de la velocidad utilizando correntómetro PASCO PS-2130 en la sección 02 de la primera campaña de medición con coordenadas E: 779767.000, N: 9207722.000 del río Chonta.....	146
<b>Figura 85</b> Instalación de la base RTK para la medición topográfica de los puntos de control. ....	146
<b>Figura 86</b> Sembrado de trazadores en la primera campaña de medición.....	147
<b>Figura 87</b> Sembrado de trazadores en la tercera campaña de medición. ....	147
<b>Figura 88</b> Estacionamiento de Drone DJI Phantom 4 RTK para el inicio de la toma de datos para determinar la velocidad superficial del río.....	148
<b>Figura 89</b> Marcas de posición aérea para la ortorectificación de las imágenes.....	148
<b>Figura 90</b> Grabación de imágenes mediante vuelo drone en la sección 01 de la tercera campaña de medición con coordenadas E: 779731.000, N: 9207437.000 del río Chonta.....	149
<b>Figura 91</b> Vista aérea de la sección 01 de la tercera campaña de medición con coordenadas E: 779731.000, N: 9207437.000 del río Chonta.....	149
<b>Figura 92</b> Trazadores (aserrín) utilizados para la caracterización del flujo en la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV).....	150
<b>Figura 93</b> Medición de los tirantes de la sección 02 de la primera campaña de medición con coordenadas E: 779767.000, N: 9207722.000 del río Chonta. ....	150

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A:</b> Formato para la recolección de datos en campo de velocimetría de partículas a gran escala (LSPIV).....	131
<b>Anexo B:</b> Secciones de la primera campaña de medición.....	133
<b>Anexo C:</b> Secciones de la segunda campaña de medición.....	137
<b>Anexo D:</b> Secciones de la tercera campaña de medición.....	141
<b>Anexo E:</b> Panel fotográfico .....	146

**Palabras clave:**

*Velocidad superficial*, es la rapidez con la que se mueve el agua, medida en metros por segundo.

*Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV)*, técnica de medición de flujo.

*Hidrometría*, parte de la hidrología que mide el volumen de agua que fluye superficialmente o un conducto en determinado tiempo.

*Vehículo aéreo no tripulado (UAV)*, se conoce como dron y es una aeronave sin piloto humano.

*Río*, corriente natural de agua que fluye en un canal con orillas definidas.

*Trazadores*, patrones que flotan sobre la superficie del agua y son de dos tipos: naturales y artificiales.

*Correntómetro*, instrumento que sirve para medir la velocidad de corrientes en los ríos.

*Topografía*, ciencia que estudia las posiciones de puntos sobre la superficie de la tierra.

## RESUMEN

El propósito de la presente tesis fue determinar con precisión la velocidad superficial con la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) del río Chonta. Se trata de un estudio tipo correlacional, aplicada y cuantitativa. La población estuvo constituida por el río Chonta y sus afluentes en Cajamarca y la muestra está representada por la zona de estudio ubicado en el río Chonta, dentro de un tramo de 3 kilómetros aproximadamente y para caracterizar el flujo se usó viruta de madera como trazador. Las variables de estudio fueron la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), el caudal y la velocidad superficial del río Chonta. Los instrumentos empleados fueron la revisión bibliográfica, trabajo de campo, trabajo de gabinete y análisis e interpretación de datos. Los resultados de las mediciones de velocidad superficial del río Chonta en cuatro puntos específicos usando correntómetro, fueron los siguientes: en la primera campaña, las velocidades fueron 0.58 m/s, 0.632 m/s, 0.48 m/s y 0.180 m/s; en la segunda campaña, 0.65 m/s, 0.80 m/s, 0.49 m/s y 0.233 m/s; y en la tercera campaña, 0.716 m/s, 0.81 m/s, 0.59 m/s y 0.48 m/s. Las mediciones utilizando la técnica LSPIV en vuelos a 20, 30 y 40 metros de altura mostraron velocidades promedio de 0.55 m/s, 0.50 m/s y 0.48 m/s en la primera campaña, 0.58 m/s, 0.53 m/s y 0.51 m/s en la segunda campaña, y 0.724 m/s, 0.693 m/s y 0.668 m/s en la tercera campaña. Asimismo, comparando ambos métodos, la técnica LSPIV demostró mayor precisión, con errores que disminuyen a menor altitud: a 20 metros, el MAPE fue del 5% al 20%, el MAE de 0.03 a 0.21, y el R-RMSE del 4% al 16%; a 30 metros, el MAPE del 5% al 25%, el MAE de 0.05 a 0.19, y el R-RMSE del 5% al 20%; y a 40 metros, el MAPE del 5% al 30%, el MAE de 0.03 a 0.23, y el R-RMSE del 10% al 35%. La técnica LSPIV demostró que esta metodología es confiable y puede ser aplicada en diversos ríos similares al río Chonta, ya que su capacidad para captar datos de alta resolución espacial y temporal hace una herramienta valiosa para estudios hidrológicos.

**Key words:**

*Surface velocity*, the speed at which water moves, measured in meters per second.

*Large-scale particle image velocimetry (LSPIV)*, a flow-measuring technique.

*Hydrometry*, part of hydrology that measures the volume of water flowing over a surface or conduit in a given time.

*Unmanned aerial vehicle (UAV)*, also known as a drone, is an aircraft without a human pilot.

*River*, natural stream of water flowing in a channel with defined banks.

*Tracers*, patterns that float on the surface of the water and are of two types: natural and artificial.

*Current meter*, an instrument used to measure the speed of currents in rivers.

*Topography*, science that studies the positions of points on the surface of the earth.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis was to accurately determine the surface velocity with the sophisticated technique of large-scale particle image velocimetry (LSPIV) of the Chonta River. It is a correlational, applied and quantitative study. The population was constituted by the Chonta river and its tributaries in Cajamarca and the sample is represented by the study area located in the Chonta river, within a stretch of approximately 3 kilometers and to characterize the flow, wood chips were used as a tracer. The study variables were large-scale particle image velocimetry (LSPIV), flow and surface velocity of the Chonta River. The instruments used were literature review, field work, desk work, and data analysis and interpretation. The results of the surface velocity measurements of the Chonta River at four specific points using a current meter were as follows: in the first campaign, the velocities were 0.58 m/s, 0.632 m/s, 0.48 m/s and 0.180 m/s; in the second campaign, 0.65 m/s, 0.80 m/s, 0.49 m/s and 0.233 m/s; and in the third campaign, 0.716 m/s, 0.81 m/s, 0.59 m/s and 0.48 m/s. Measurements using the LSPIV technique in flights at 20, 30 and 40 meters showed average velocities of 0.55 m/s, 0.50 m/s and 0.48 m/s in the first campaign, 0.58 m/s, 0.53 m/s and 0.51 m/s in the second campaign, and 0.724 m/s, 0.693 m/s and 0.668 m/s in the third campaign. Also, comparing both methods, the LSPIV technique showed higher accuracy, with errors decreasing at lower altitude: at 20 meters, the MAPE was from 5% to 20%, the MAE from 0.03 to 0.21, and R-RMSE from 4% to 16%; at 30 meters, MAPE from 5% to 25%, MAE from 0.05 to 0.19, and R-RMSE from 5% to 20%; and at 40 meters, MAPE from 5% to 30%, MAE from 0.03 to 0.23, and R-RMSE from 10% to 35%. The LSPIV technique demonstrated that this methodology is reliable and can be applied in several rivers similar to the Chonta River since its capacity to capture high spatial and temporal resolution data makes it a valuable tool for hydrological studies.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la presente investigación titulada “Estimación de la velocidad superficial del río Chonta mediante la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca en el año 2023” fue elaborado con la finalidad de realizar mediciones de la velocidad superficial del río Chonta haciendo uso de la metodología sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), cuyo propósito es validar este método haciendo uso del correntómetro, teniendo en cuenta que la velocidad superficial es un parámetro fundamental para el monitoreo hidrológico además a lo largo del río Chonta no se cuenta con estaciones hidrométricas. Así, ayudar a resolver el problema de la escasez de información e implementación de metodologías de medición menos costosas y cuidado la integridad del operador de instrumentos de medición en máximas avenidas.

El río Chonta presenta un gran potencial hídrico, el cual es aprovechado con emplazado diversas estructuras hidráulicas de captación en su mayoría destinadas al uso agrícola. El monitoreo hidrológico es indispensable en los sistemas fluviales, siendo la velocidad del río una variable crucial. Este parámetro no solo ayuda a prevenir eventos catastróficos como sequías e inundaciones, sino también permite controlar la sobreexplotación de los recursos hídricos. Es importante señalar que el caudal se determina mediante la combinación de la velocidad con el área de la sección de medición.

El estudio utilizó una serie de puntos de medición para representar una sección de aproximadamente 3 km del río Chonta, situada entre la captación Remonta II y el Puente Chonta. Además, el área de estudio se encuentra en la cuenca del río Chonta. Esta cuenca comprende tres distritos: Baños del Inca, La Encañada y Cajamarca. La velocidad superficial del tramo del río Chonta, utilizando la técnica LSPIV, se determinó con la ayuda de los softwares de procesamiento PIVlab, RIVeR y Excel. Además, para la preparación de insumos para el procesamiento se hizo uso de los softwares QGIS y Civil 3D, permitiéndonos optimizar los flujos de trabajo para llegar a los resultados correctos.

### **1.1. Planteamiento del problema**

En Cajamarca, el río Chonta es considerado como uno de los ríos más considerables, y la velocidad superficial es un parámetro significativo para el monitoreo hidrológico, asimismo sirve para la cuantificación de caudales y este a su vez es importante para el abastecimiento de

agua potable y riego en la zona. Sin embargo, la medición de la velocidad superficial es un procedimiento complicado y caro, que demanda el uso de equipos y personal especializado. Hoy en día, se emplea principalmente la técnica de medición con correntómetro, que no es tan precisa y no permite cubrir toda la sección del río.

Hauet et al., (2018) señalaron que, debido a las altas velocidades y objetos flotantes, resulta peligroso que los operadores humanos midan directamente el río. En condiciones extremas, utilizar correntómetros o perfiladores acústicos de corrientes Doppler (ADCP) es arriesgado, mientras que los métodos de dilución de trazadores se ven limitados por la carga de sedimentos suspendidos.

En los ríos obtener la medición específica de la velocidad plantea retos en la creación de redes de monitoreo hidrológico, debido a elementos como el ancho, la profundidad, la variabilidad del flujo y la estabilidad de la sección transversal. Las técnicas de medición tienen limitaciones operativas y pueden generar incertidumbre en condiciones fuera de su rango óptimo, lo que dificulta su implementación en situaciones de flujo poco profundo o inundaciones (Perks et al., 2020).

La cuenca del Río Chonta posee un considerable potencial hídrico y está equipada con 58 sistemas de riego, los cuales incluyen 58 puntos de extracción de agua y una extensión total de 239.52 km de canales principales. De estos sistemas, cuatro se abastecen de lagunas o puquios, manantiales, en cambio el resto se nutre de ríos o quebradas (Nippon Koei Co. Ltd. (NK), 2010). Ante el aumento en la demanda de este recurso, resulta crucial optimizar las técnicas de medición de la velocidad superficial en el Río Chonta utilizando un método no intrusivo y de bajo costo, como la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (Large Scale Particle Image Velocimetry o LSPIV, por sus siglas en inglés), con el objetivo de realizar un monitoreo hidrológico eficaz.

LSPIV permite el monitoreo remoto y no intrusivo de variedad de flujos superficiales como ríos, es considerada una técnica moderna y experimental. Esta técnica se fundamenta en el análisis del movimiento de las partículas que se mueven en el agua o por patrones provocados por la turbulencia, y tiene un gran potencial para el monitoreo de cuerpos de agua. (Botelli, 2020).

### **1.1.1. Contextualización del problema**

En Cajamarca, el río Chonta es uno de los principales ríos y juega un papel fundamental. Se considera al parámetro de velocidad superficial del río como crítico para el monitoreo hidrológico, ya que se utiliza en la cuantificación de caudales. Este último aspecto es de mucha importancia para la comunidad local, puesto que se logra un suministro de agua potable y de riego en la zona. Sin embargo, medir la velocidad superficial del río es un proceso complejo y costoso que actualmente se realiza principalmente con correntómetros, una técnica que presenta limitaciones en términos de precisión y cobertura de la sección del río.

La situación se vuelve aún más compleja debido a la existencia de condiciones peligrosas, como altas velocidades y objetos flotantes en el río, producidas por las máximas avenidas, lo que hace arriesgado que los operadores humanos realicen mediciones directas. Las técnicas actuales, como el uso de correntómetros, o perfiladores acústicos de corrientes Doppler (ADCP), tienen limitaciones en condiciones extremas. Además, este último método está restringido por la poca profundidad que presenta el río.

### **1.1.2. Descripción del problema**

Medir con precisión la velocidad superficial del río Chonta presenta desafíos significativos. Factores como el ancho del río, su profundidad, la velocidad del agua y la estabilidad de la sección del lecho de río complican el uso de técnicas de medición convencionales. La limitación operativa de estas técnicas puede generar incertidumbre, especialmente en situaciones de flujo poco profundo o inundaciones.

La cuenca del río Chonta, posee un considerable potencial hídrico, caracterizado por la presencia de múltiples estructuras hidráulicas, específicamente captaciones. Sin embargo, debido a las velocidades elevadas del flujo durante las máximas avenidas, estas infraestructuras tienden a sufrir deterioro, comprometiendo su vida útil. Además, es relevante mencionar la ausencia a lo largo del río de estaciones hidrométricas, llevando a errores en la planificación de futuros proyectos.

Se propone tratar esta problemática, por medio de la implementación de un método de monitoreo hidrológico no intrusivo y de bajo costo: la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV). Esta técnica moderna y experimental permite el monitoreo remoto y no intrusivo de flujos superficiales en cauces naturales, al analizar el desplazamiento de partículas o patrones generados por la turbulencia en la superficie del agua. La adopción de LSPIV se

plantea como una solución efectiva para llevar a cabo un monitoreo hidrológico más preciso y seguro en el río Chonta.

### **1.1.3. Formulación del problema**

¿Cómo podría la aplicación de la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) mejorar la precisión y confiabilidad de los datos de velocidad superficial en el río Chonta, distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca en el año 2023?

## **1.2. Hipótesis de la investigación**

Mediante la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) nos permitirá contar con data de alta precisión de la velocidad superficial del río Chonta, Baños del Inca, provincia de Cajamarca.

Variables intervinientes:

*Variable 1:* Caudal del río Chonta.

*Variable 2:* Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV).

*Variable 3:* Velocidad superficial del río Chonta.

## **1.3. Justificación de la investigación**

### **1.3.1. Justificación científica**

Esta investigación presenta una sólida base científica, ya que aborda la necesidad de comprender y gestionar de manera eficiente el recurso hídrico del río Chonta en la región Cajamarca. Para realizar un monitoreo hidrológico preciso y evaluar su impacto ambiental es muy esencial medir con precisión la velocidad superficial del río. La aplicación de la técnica avanzada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) representa una contribución significativa al campo de la hidrometría e hidrología. Esta innovación tecnológica no solo mejora la calidad de las mediciones, sino que también facilita la posibilidad de poder adquirir datos más precisos sobre el comportamiento del río, lo que es fundamental para comprender mejor los fenómenos hidrológicos locales.

### **1.3.2. Justificación técnica-práctica**

En términos técnico-prácticos, el uso de la técnica LSPIV para medir la velocidad superficial del río Chonta se justifica por su eficiencia y precisión en comparación con las técnicas tradicionales. La LSPIV permite obtener mediciones en tiempo real a gran escala, lo que facilita

la recopilación de datos continuos y detallados sobre el comportamiento del río. Esto no solo optimiza la planificación del uso del agua, sino que también proporciona información valiosa para realizar una gestión eficiente del riesgo de inundaciones, el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria. La aplicación de esta técnica en el río Chonta representa una oportunidad práctica para ofrecer resultados más confiables y actualizados y de esta manera mejorar la gestión del agua.

### **1.3.3. Justificación institucional y personal**

A nivel institucional, esta investigación contribuye con avance de la ciencia y la tecnología en el ámbito de la hidrología, promoviendo la aplicación de técnicas innovadoras en la gestión del agua. Además, la falta de investigaciones previas sobre la aplicación de LSPIV en el río Chonta resalta la necesidad de generar conocimiento local para informar políticas y prácticas de gestión del agua específicas de la región Cajamarca.

Desde una perspectiva personal, la investigación refleja el mejoramiento de la forma de vida de población Cajamarquina al abordar directamente cuestiones clave como la seguridad hídrica, la mitigación de gestión de riesgos y el desarrollo sostenible. La aplicación de la LSPIV en este contexto no solo representa un avance técnico, sino también un esfuerzo concreto para beneficiar a la sociedad local, reduciendo los riesgos asociados al agua y promoviendo un uso más sostenible y eficaz del agua.

### **1.4. Delimitación de la investigación**

Se realizará este estudio en el río Chonta, en un tramo aproximado de 3 kilómetros, comprendido entre las coordenadas UTM de inicio 779716.25 m E y 9210161.28 m N (Captación Remonta II) y punto final del tramo 779896.145 m E y 9207286.76 m N (Puente Chonta). Durante este tramo, se elegirán cuatro puntos concretos con el objetivo de lograr recolectar información significativa para consecutivamente procesarla.

La investigación hace énfasis en mejorar la medición de la velocidad superficial del río Chonta utilizando la técnica sofisticada de LSPIV, lo que permitirá obtener información más precisa y detallada sobre el flujo del río.

La técnica sofisticada de LSPIV se emplea para medir la velocidad del agua mediante el seguimiento de partículas (trazadores) en la superficie del río. Para llevar a cabo este proceso, se utilizarán vehículos aéreos no tripulados para la grabación de videos que capturen el flujo en el curso del río.

Además, se utilizará el software RIVeR y PIVlab para procesar y obtener resultados de los datos recopilados, lo que facilitará alcanzar un detallado análisis de las velocidades superficiales obtenidas en el río. Asimismo, se realizará la comparación con datos obtenidos con correntómetro (método tradicional), con fines de validación de la técnica sofisticada de LSPIV.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar con precisión la velocidad superficial con la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) del río Chonta, distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca en el año 2023.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Analizar el proceso de medición de la velocidad superficial del río Chonta mediante la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) y el uso de correntómetro.
- Determinar la velocidad superficial del río Chonta utilizando el método del correntómetro.
- Determinar la velocidad superficial del río Chonta utilizando la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV).
- Comparar las mediciones de la velocidad superficial del río Chonta obtenidas mediante la técnica sofisticada de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) con las registradas por el correntómetro.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes teóricos de la investigación

Específicamente, en Cajamarca, no se encontró ninguna investigación que usando la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) determine la velocidad superficial del río Chonta. Sin embargo, a nivel nacional se contó con una investigación que haciendo uso de la técnica LSPIV logro determinar la velocidad superficial en ríos, asimismo en el ámbito internacional se logró obtener información suficiente como bases teóricas para esta investigación

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

- Guillén (2019) en su tesis de doctorado “*Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV*” de la Universidad Nacional de Córdoba, tuvo como objetivo aplicar LSPIV para lograr determinar un evento hidrológico extremo con la ayuda de videos de dominio público. Sus resultados obtenidos le permitieron obtener caudales, además de la zona inundada, así como también las velocidades medias distribuidas especialmente de ese evento extremo, esa información es importante en un modelo hidrodinámico en esa sección del rio. Concluye que, para mejorar el método LSPIV se debe relacionar la velocidad media y la velocidad media superficial y de esta manera encontrar el coeficiente  $\alpha$  (alfa) basándose en datos recolectados in situ durante la grabación del video y de esta manera determinar caudales.
- Santillán y Rivero (2020) desarrollaron la tesis de grado “*Estudio análisis y verificación del canal constitución mediante implementación de la técnica LSPIV*” en la Universidad Católica de Salta. Su investigación fue de tipo experimental – transversal, su objetivo fue verificar que el drenaje pluvial de la zona norte de la Ciudad de Salta evacúe correctamente, ya que el aumento descontrolado de la población sin planificación ocasiono la construcción de canales. Los autores concluyen que haciendo uso de LSPIV obtuvieron resultados semejantes en comparación con los métodos habituales. También evidenciaron que el comportamiento de las velocidades presentaba un aumento en la dirección al centro de la sección del canales. Además, comprobaron que LSPIV, es sensible cuando no se tiene patrones suficientes en el agua y la variación de la posición especialmente cuando se mide la velocidad en diferentes tiempos. Sin embargo, así no sean aceptables los patrones en un video se aceptan los valores obtenidos de velocidad.

- Liu et al. (2021) realizaron un estudio titulado “*Large-Scale Particle Image Velocimetry to Measure Streamflow from Videos Recorded from Unmanned Aerial Vehicle and Fixed Imaging System*” en la National United University. En la investigación se analizaron y compararon las velocidades superficiales medidas en el río Houlong, Taiwán, utilizando (LSPIV) capturada tanto por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) como por una estación fija terrestre.

Los resultados revelaron que, en condiciones de bajo flujo, las velocidades superficiales medidas utilizando LSPIV desde un UAV a alturas de disparo de 9, 12 y 15 metros presentaron errores absolutos medios dentro del rango de  $0.055 \pm 0.015$  m/s, lo cual fue inferior a los obtenidos utilizando LSPIV desde la estación fija terrestre (0.34 m/s). Los errores absolutos medios obtenidos mediante LSPIV a partir de fotografías aéreas tomadas por el UAV a una altura de vuelo de 12 metros, sin partículas de siembra y con diferentes densidades de partículas de siembra, fueron ligeramente diferentes y se ubicaron en el rango de  $0.095 \pm 0.025$  m/s.

En condiciones de alto flujo, los errores absolutos medios asociados con el uso de LSPIV derivado de la fotografía fija terrestre y LSPIV derivado de un UAV a alturas de vuelo de 32, 62 y 112 metros fueron respectivamente de 0.46 m/s y 0.49 m/s, 0.27 m/s y 0.97 m/s.

- Lin et al. (2022) desarrollaron el artículo científico “*Application of Image Technique to Obtain Surface Velocity and Bed Elevation in Open-Channel Flow*” en la National Taiwan University. En este estudio, se propuso un método combinado con LSPIV para estimar la batimetría. Los experimentos que combinaron la técnica LSPIV y la ecuación de continuidad para obtener la elevación del lecho se realizaron en un canal de 27 m de largo y 1 m de ancho. Los resultados de LSPIV se verificaron utilizando mediciones de velocimetría Doppler acústica (ADV), y los datos de elevación del lecho de este estudio se verificaron utilizando mediciones convencionales de medidores puntuales. Los resultados indican que el método propuesto estimó efectivamente la variación de la elevación del lecho, especialmente en el nivel de aguas poco profundas, con una precisión promedio del 90,8%. También, mostraron los experimentos realizados que es viable combinar la técnica de imagen no intrusiva con el cálculo numérico para resolver la profundidad del agua y la elevación del lecho

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

- Rosas y Tejada (2020) desarrollaron la tesis de grado “*Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales*” en la Universidad Peruana Unión. Presentan una investigación tipo experimental – transversal, cuyo objetivo de dicha tesis fue valorar el método LSPIV haciendo uso de videos de uso público donde se determina la vulnerabilidad con un enfoque en la estabilidad del video. Asimismo, la investigación concluye que la determinación de la velocidad superficial ( $v$ ) y el tirante del agua ( $h$ ) es posible gracias al método utilizado. Además, la técnica LSPIV tiene un buen desempeño especialmente en zonas críticas, donde existe alto caudal y lugares con difícil acceso con la ayuda de drones para grabar los videos, para zonas de gran magnitud, específicamente ríos con un área de más de 500m<sup>2</sup>.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV)**

#### **a. Definición**

La técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, ‘Large-Scale Particle Image Velocimetry’ en inglés) es un método no intrusivo para determinar la velocidad superficial de agua que fluye libremente (Ishizawa, 2022).

LSPIV es una metodología basada en imágenes que mide de forma no intrusiva las velocidades bidimensionales e instantáneas de la superficie libre del agua utilizando equipos de vídeo estándar y económicos. Se reconoce que el LSPIV es un medio robusto para delimitar el campo de velocidades en la superficie del agua (Fakhri et al., 2021).

#### **b. Origen**

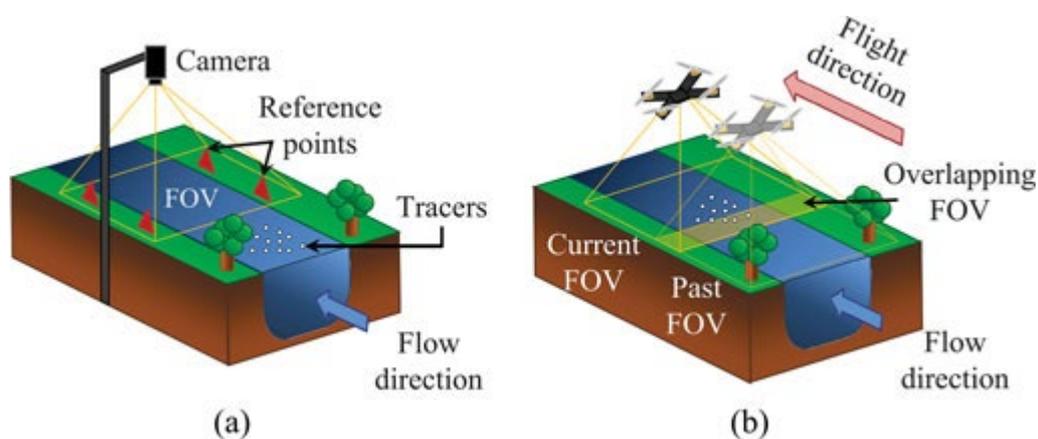
La LSPIV es una extensión de la velocimetría de imágenes de partículas (en inglés PIV, ‘Particle Image Velocimetry’), la que produce campos de velocidad en la superficie del agua basándose en imágenes de video tomadas en laboratorio o en campo (Ishizawa, 2022).

### c. Historia

LSPIV nació de la técnica de velocimetría de imagen de partículas (PIV). Respecto a la ingeniería hidráulica se está tornando una herramienta muy utilizada, esto debido a fácil adaptabilidad y bajo costo. Asimismo, esta técnica considerada como no intrusiva permite determinar la velocidad de los ríos mediante videos tomados por cámaras estáticas o aéreas, a menudo en entornos de crecidas y estiaje, en donde los métodos tradicionales son difíciles de utilizar (Rosas et al., 2021).

### Figura 1

Esquemas de (a) una implementación LSPIV fija tradicional y (b) la configuración LSPIV basada en imágenes aéreas.



*Nota.* Los gráficos muestran el esquema de la toma de datos de la velocidad del flujo mediante una cámara fija y una cámara en movimiento. Tomado de Tauro et al., (2015).

La medición de la velocidad en corrientes naturales o artificiales mediante la técnica LSPIV proporciona una herramienta de monitoreo económico, rápido y seguro (Liu et al., 2022).

### d. Metodología

#### • Selección del lugar de medición

La elección del lugar de los puntos de medición en los ríos depende del objetivo de estudio. En estudios acerca de la respuesta de las cuencas ante precipitaciones, se selecciona un punto de medición cerca al punto de drenaje de la cuenca; en los estudios de balance hídrico de los lagos, se elige un lugar cercano a la salida de los principales ríos o quebradas que ingresan y drenan en el lago; en la planificación de uso del suelo o en el diseño de estructuras hidráulicas, se elige un punto cerca del emplazamiento de la estructura o plan (Dingman, 2015).

Asimismo, el autor citado con anterioridad menciona que la ubicación específica de un sitio de medición depende de:

- la accesibilidad física;
- la accesibilidad legal (p. ej., permiso del propietario);
- la presencia de condiciones adecuadas para la medición seleccionada (p. ej., condiciones de vadeo del arroyo o presencia de puente, compatibilidad del tamaño del arroyo y vertedero o canaleta);
- la capacidad de medir el caudal total en todas las etapas (p. ej., minimización del caudal que elude la presa o aforador);
- ausencia de condiciones que afecten los niveles de agua y/o la descarga causando relaciones adulteradas entre la descarga y la etapa (por ejemplo, remansos de lagos, afluentes, presas, descargas de aguas pluviales o fluctuaciones de las mareas).

- **Cámara**

- **Cámaras fijas**

Registrar velocidades con este tipo de cámaras, es sencillo, la cual consiste en fijar una cámara en un punto de interés para filmar el flujo, estas cámaras son similares a las de control de tránsito o seguridad. Asimismo, si se desea obtener los caudales en ese punto es indispensable contar con la batimetría comportamiento del fondo del río (Bolatti, 2019).

- **Cámaras aéreas**

Las cámaras aéreas se componen principalmente de drones, su utilización sencilla permite ser usados como dispositivos de medición sobre la corriente del río. Estos dispositivos cuentan con un cardán, posibilitando la estabilización de la imagen, además que permite un control a larga distancia. De esa manera, se logra posicionar la cámara perpendicular al río. Se recomienda que el dron mantenga una altitud específica sobre el río. Si vuela demasiado bajo, crea corrientes de aire que afectan el flujo natural del río, mientras que volar demasiado alto dificulta la identificación de los patrones en el flujo del agua (Ribeiro, 2021).

- **Trazadores**

La determinación de la velocidad del flujo mediante la técnica de LSPIV requiere la presencia de patrones conocidos como trazadores. Varios estudios (Tamari, 2011; Sharif, 2022) clasifican los trazadores en dos tipos: naturales y artificiales.

- Trazadores naturales: son aquellos formados de manera natural en el agua, como espuma, burbujas de aire, producidos por la turbulencia.
- Trazadores artificiales: incluyen elementos introducidos en el flujo, como bolas de poliestireno, biobolas, tiritas de papel, virutas de madera, entre otros.

Es significativo señalar que no existe gran variedad de investigaciones en relación con el tamaño de partícula a utilizar. La visibilidad del patrón ante la cámara es un factor esencial y, por lo tanto, la elección del tamaño de partícula debe ser cuidadosamente considerada en función de su capacidad para ser detectado y rastreado en las imágenes capturadas.

- **Software de análisis**

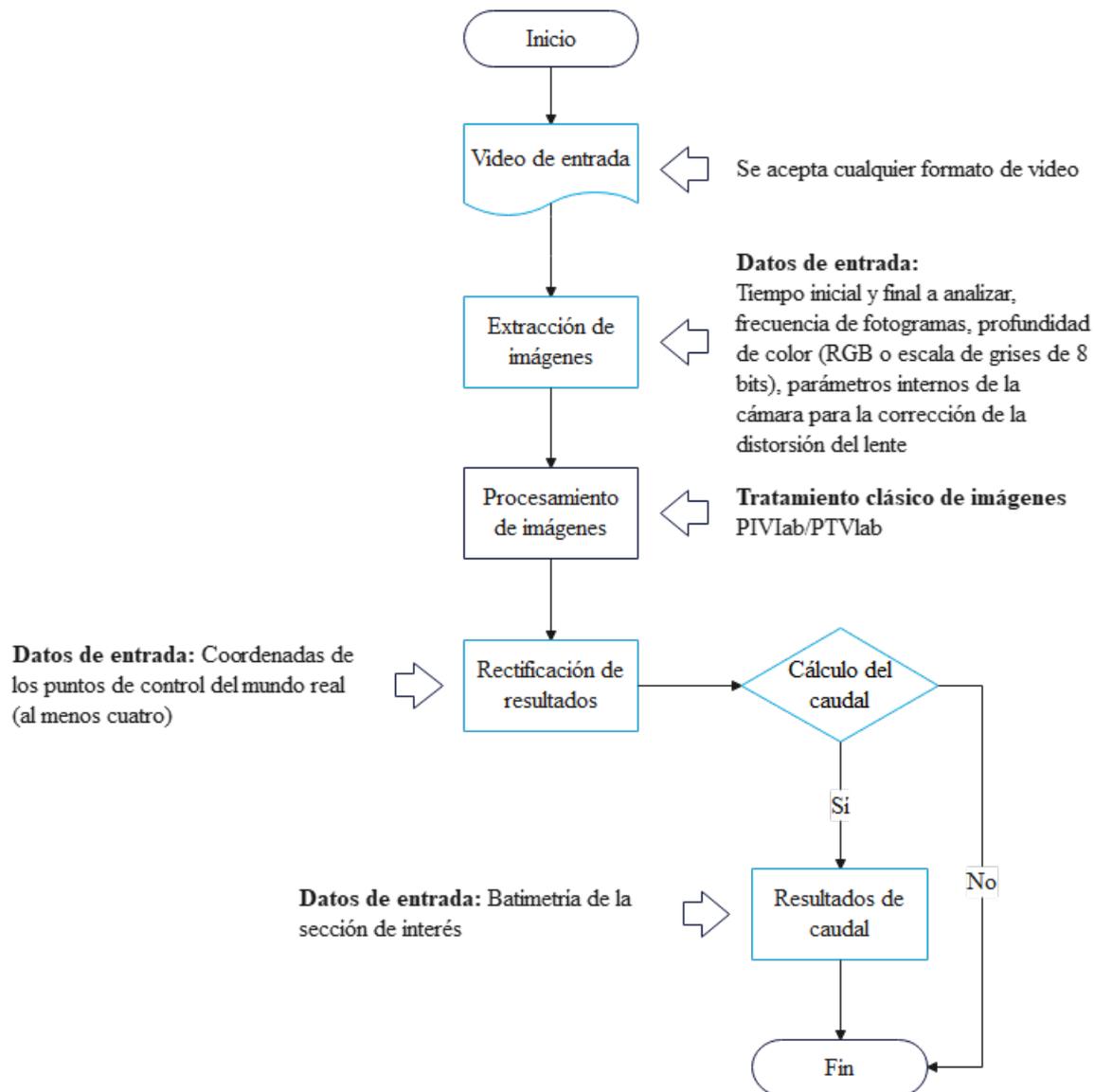
Dentro del ámbito de LSPIV, se sitúa de una gran variedad de programas informáticos que agilizan el procesamiento de datos para conseguir resultados representativos. Entre estos, se destacan los denominados softwares libres u open source. Algunos de los más populares incluyen Fudaa-LSPIV, pyOpenRiverCam, OpenPIV, PIVlab y RIVeR. Cabe destacar que, para la presente investigación, los dos últimos mencionados, es decir, PIVlab y RIVeR, desempeñarán un papel fundamental.

### **2.2.2. RIVeR**

RIVeR es una aplicación gratuita e independiente compilada en el entorno de Matlab cuya aplicación fue desarrollada en Argentina por la Universidad Nacional de Córdoba en el año 2013 en el Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CETA). Además, se desarrolló con la finalidad de estimar velocidades superficiales y caudales en ríos o modelos físicos hidráulicos.

**Figura 2**

*Diagrama de flujo del sistema de análisis a gran escala. Los módulos en azul forman parte de la caja de herramientas RIVeR.*



*Nota.* Diagrama de flujo presenta tres componentes de análisis principales (extracción de imágenes, procesamiento de imágenes y rectificación de resultados) y uno opcional (cálculo de caudal). Adaptado de Patalano et al. (2017).

### **a. Extracción de imágenes**

RIVeR presenta un módulo de extracción de imágenes desde un video, el cual transforma en imágenes en escala de grises de 8 bits, asimismo se pueden cambiar la velocidad de fotogramas para analizar la velocidad del flujo. Además, es posible realizar una corrección de la distorsión de lente, basada en una subrutina de Matlab (Patalano et al.,2017), la cual, es descrita como:

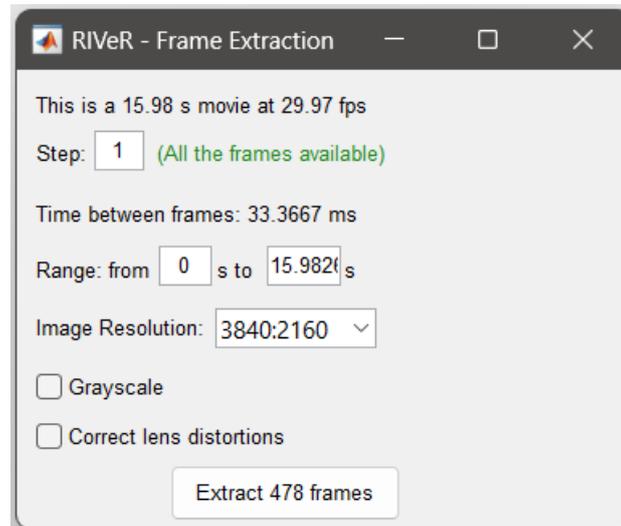
$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = KK \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ donde } KK = \begin{pmatrix} f_{cx} & \alpha_0 * f_{cx} & c_{cx} \\ 0 & f_{cy} & c_{cy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Donde

- $X_p, Y_p$  : Coordenadas de un punto en el sistema de coordenadas distorsionado
- $X_d, Y_d$  : Coordenadas de un punto en el sistema de coordenadas no distorsionado
- $f_{cx}$  : Distancia focal en las direcciones x
- $f_{cy}$  : Distancia focal en las direcciones y
- $c_{cx}, c_{cy}$  : Centro de la imagen
- $\alpha_0$  : Coeficiente de sesgo que define el ángulo entre los ejes de píxeles x e y
- $KK$  : Obtenido a partir de múltiples vistas de un tablero de ajedrez de dimensiones conocidas con la caja de herramientas Camera Calibration

### Figura 3

Ventana del módulo de interfaz de RIVeR para la extracción de imágenes.



*Nota.* En el módulo de extracción de imágenes incluye las opciones de escala de grises y la corrección por distorsión.

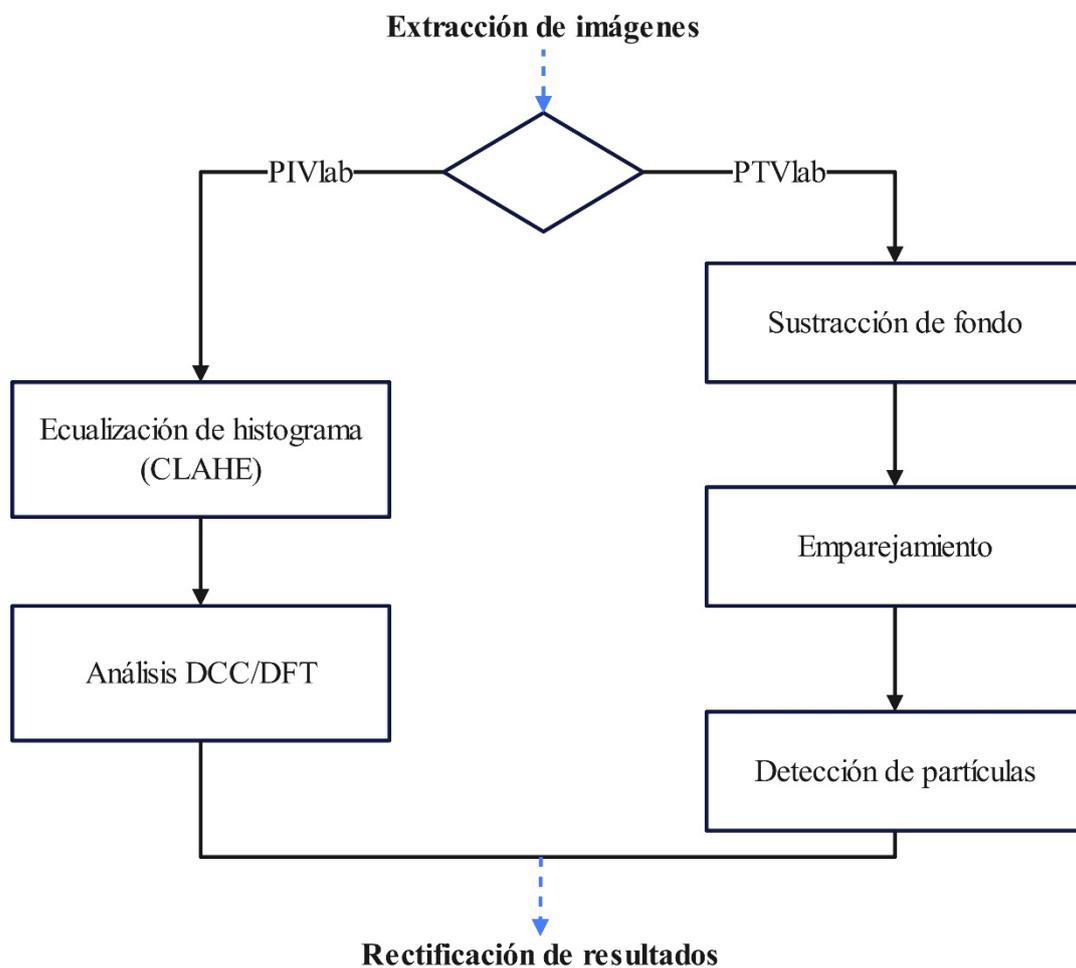
#### b. Tratamiento de imágenes

El tratamiento de imágenes no se realiza en la caja de herramientas de RIVeR. Las subsecuencias se muestran en la Figura 4. El procesamiento de las imágenes previamente obtenidas se basará en la información requerida. Para un análisis PIV, se empleará PIVlab, dado que se enfoca en un desarrollo euleriano y también incorpora ciertos filtros de mejora de

imagen como el Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). Este filtro extiende los histogramas de intensidad a todo el rango de datos actuando en pequeñas áreas de la imagen. Para un análisis PTV se usará PTVlab presenta un desarrollo lagrangiano, este tipo de análisis es recomendado para un campo de velocidades de flujo cerca de estructuras hidráulicas.

**Figura 4**

*Diagrama de flujo de las subsecuencias clásicas de tratamiento de imágenes con PIVlab o PTVlab.*



*Nota.* El diagrama de flujo muestra una secuencia para el tratamiento de imágenes con PIVlab y PTVlab, según sea la condición de análisis. Adaptado de (Patalano et al., 2017).

### c. Rectificación de resultados

Después del procesamiento clásico de imágenes bidimensionales utilizamos nuevamente RIVeR para rectificar los resultados, además RIVeR soporta archivos procedentes de PIVlab o

PTVlab. Este paso está relacionado directamente con el sistema de coordenadas del mundo real en su proyección bidimensional en las imágenes (Patalano et al., 2017).

Se debe tener en cuenta que la superficie de análisis representa el plano que será rectificado. El plano no necesariamente tiene que ser horizontal, en algunos casos puede estar ligeramente inclinado, donde, RIVeR tiene en cuenta la pendiente. La matriz de cámara incluye parámetros intrínsecos (parámetros que dependen únicamente de la cámara) y extrínsecos. Esto permite proyectar las coordenadas del mundo real al sistema homogéneo de la imagen (Patalano et al., 2017):

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Donde

$\tilde{x}, \tilde{y}$  y  $\tilde{z}$  : Componentes de las coordenadas homogéneas de la imagen

$X, Y$  y  $Z$  : Coordenadas cartesianas del mundo real

Las coordenadas de la imagen en un sistema cartesiano se calculan como:

$$x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{z}}, y = \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}} \quad (3)$$

Según Patalano et al., (2017), menciona que para representaciones de planos de la superficie de agua de la zona de interés las componentes de  $Z$  de la ecuación (2) pueden ignorarse, obteniendo la ecuación (4) a continuación.

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

El vector de lado izquierdo de la ecuación (4) representa las coordenadas del mundo real, asimismo, el vector de lado derecho representa la proyección de la imagen sobre las coordenadas del mundo real, y  $H$  es la matriz de homografía. Las ocho incógnitas que quedan pueden resolverse conociendo las coordenadas  $(X_r, Y_r)$  de solo cuatro Puntos de Control (PC).

RIVeR en el proceso de ortorectificación utiliza la ecuación (4). La Matriz de la cámara  $C$  permite transformar las coordenadas del mundo real en píxeles. Se debe tener en cuenta que hay una posibilidad de simplificar las mediciones de PC, solamente realizándose con una cinta métrica, esto gracias a la resolución de la matriz de homografía  $H$  (Patalano et al., 2017).

Los resultados de PIVlab o PTVlab son desplazamientos que pueden expresarse como:

$$\vec{d}_i = X_{pi}^e - X_{pi}^o, \quad (5)$$

Donde

$\vec{d}_i$  : Vector de desplazamiento  
 $X_{pi}^e$  y  $X_{pi}^o$  : Coordenadas proyectadas del origen y el final del vector, respectivamente

El desplazamiento en el mundo real se calcula entonces como

$$\vec{D}_i = X_{ri}^e - X_{ri}^o, \quad (6)$$

Donde

$\vec{D}_i$  : Vector de desplazamiento rectificado  
 $X_{ri}^e$  y  $X_{ri}^o$  : Coordenadas del mundo real del origen y el final del vector, respectivamente

La velocidad del mundo real se calcula como

$$\vec{V}_i = \frac{\vec{D}_i}{\Delta t}, \quad (7)$$

Donde

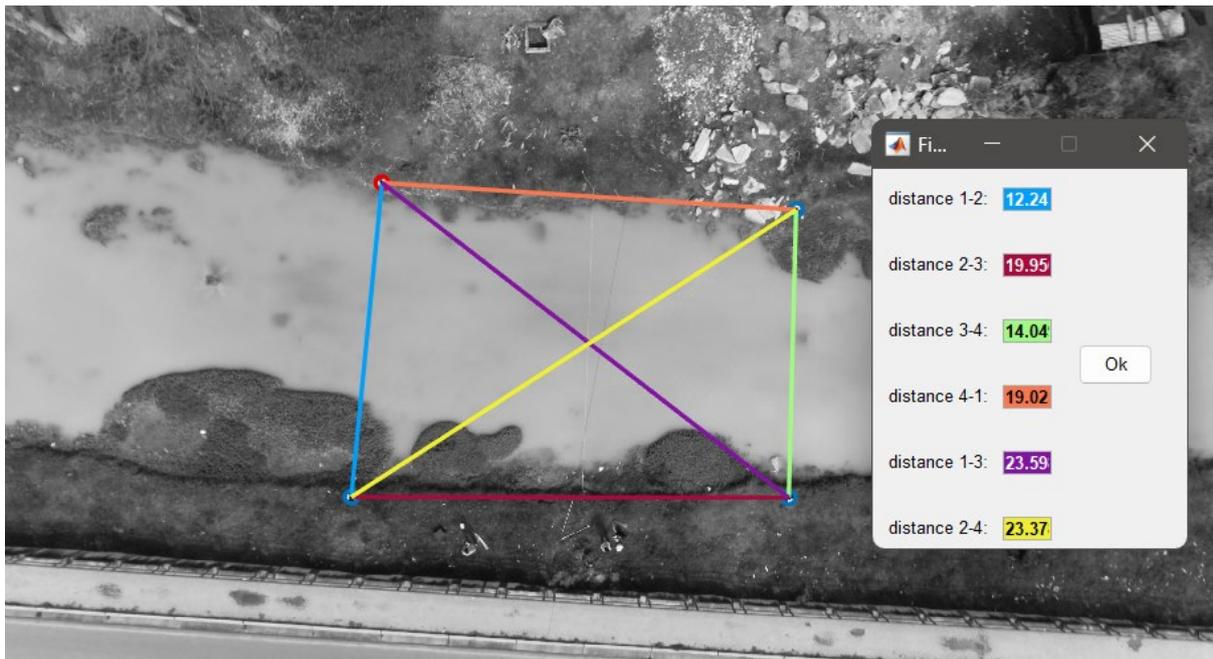
$\Delta t$  : Paso de tiempo entre las imágenes extraídas (elegidas en el módulo de extracción de imágenes)

La rectificación de resultados requiere de Puntos de control (PC), estos pueden ser puntos identificables como rocas, tronco de árboles, bordes de estructuras, entre otros. RIVeR tiene la

posibilidad de importar coordenadas desde archivos Excel, así como de forma manual, siendo como mínimo 4 puntos de control y luego proyectarlo a píxeles. Luego, se construye un sistema de coordenadas haciendo uso de los mínimos cuadrados y considerando como origen a uno de los cuatro puntos de control Figura 5 (Patalano et al., 2017).

### Figura 5

*Interfaz de RIVeR donde se definen los puntos de control visibles y sus respectivas distancias.*

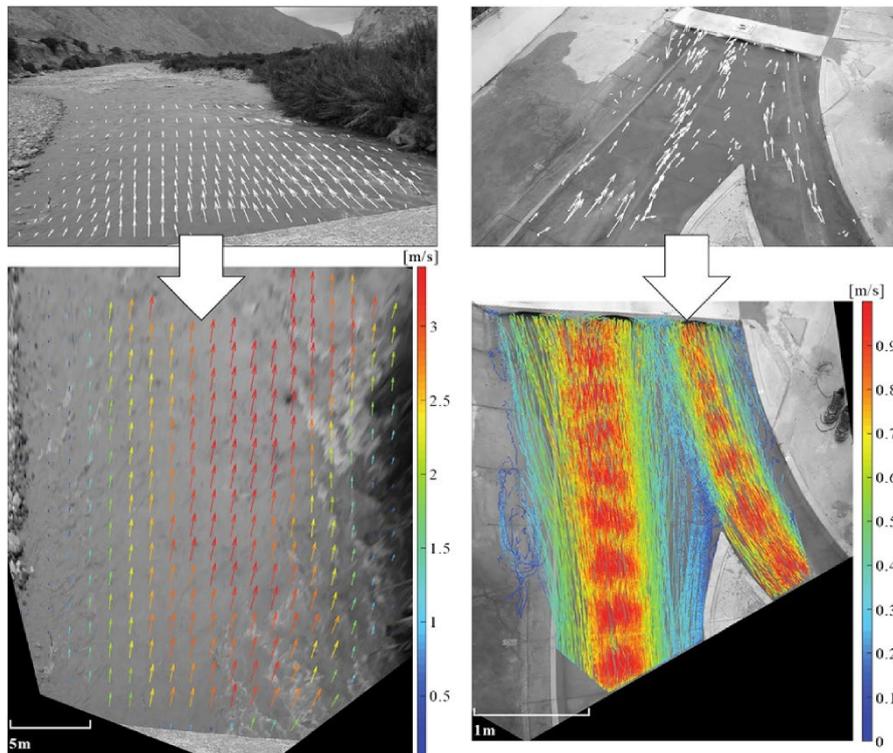


*Nota.* La figura muestra la definición de 4 puntos de control (PC), con sus respectivas distancias donde se representa con un color diferente.

El tiempo computacional es optimizado gracias al uso de una cuadrícula. La rectificación de los resultados en RIVeR no requiere de apreciable tiempo computacional, ya que la mayor parte del análisis se hace mediante PIVlab. También se rectifica una sola imagen y se utiliza como fondo para que se superpongan los resultados Figura 6 (Patalano et al., 2017).

## Figura 6

Resultados de rectificaciones de análisis LSPIV utilizando RIVeR.



*Nota.* La imagen de la parte izquierda de arriba hacia abajo describe los resultados del río Pisco en Perú, asimismo la imagen de la parte derecha de arriba hacia abajo describe los resultados de un modelo físico desarrollado en Argentina. Tomado de (Patalano et al., 2017).

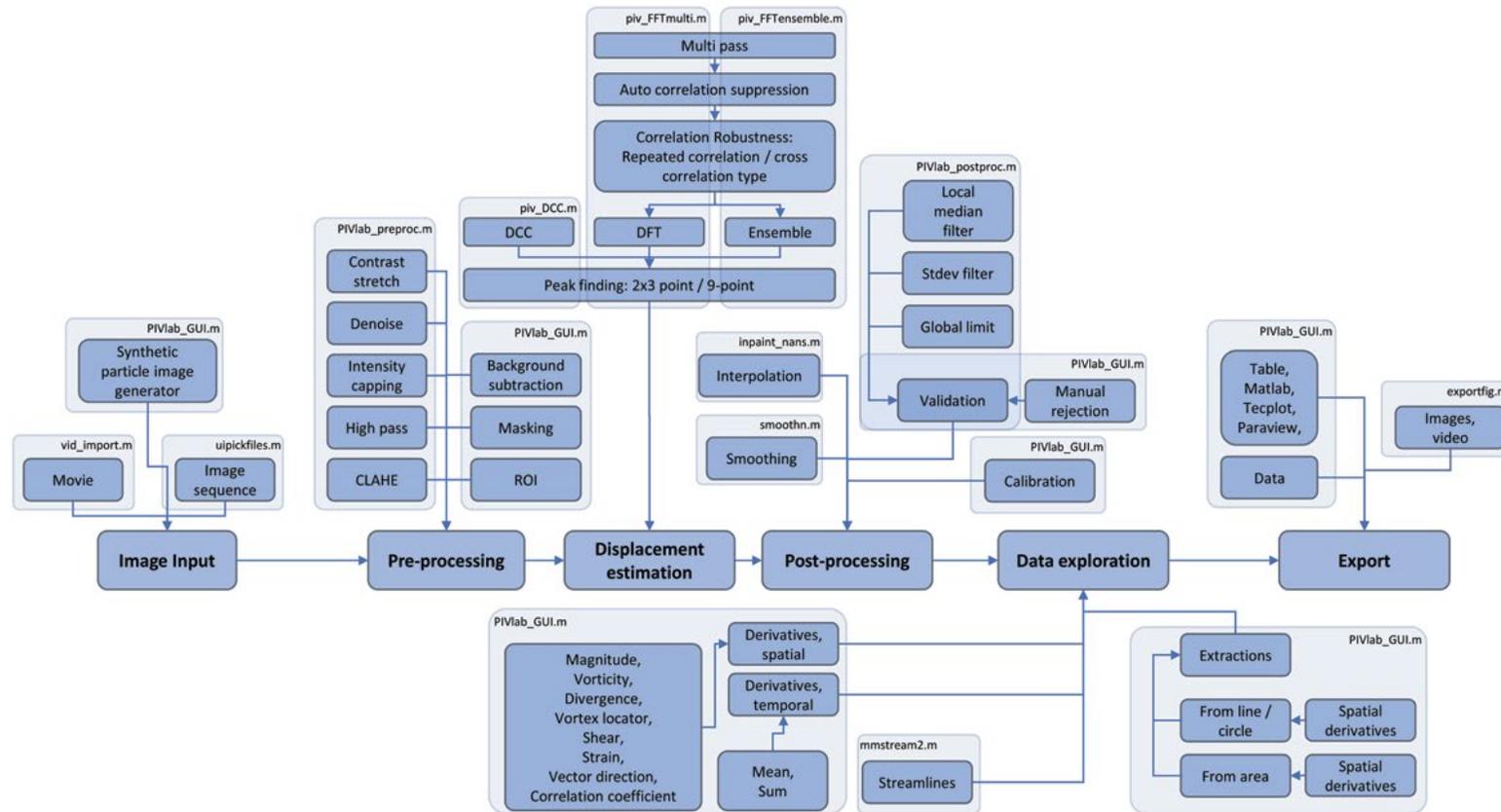
### 2.2.3. PIVlab

PIVlab es un software de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) basado en una interfaz gráfica de usuario, ejecutado en el entorno de MATLAB®. En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo de la arquitectura del software y el contenido de los archivos que contienen funcionalidades individuales. Un análisis PIV empieza con la entrada de la imagen y finalmente termina con la exportación de datos (Thielicke y Sonntag, 2021).

El software fue desarrollado por el Instituto de Investigación de Energía y Sostenibilidad de Groningen, Países Bajos, es una herramienta que se puede usar de forma gratuita y de código abierto. Además, el programa es accesible desde la línea de comandos de MATLAB y esto ofrece la posibilidad de automatizar fácilmente todo el proceso, incluirlo en otras aplicaciones y, en general, beneficiarse de todas las amplias funciones de trazado y manejo de datos de MATLAB (Thielicke y Sonntag, 2021).

**Figura 7**

*Diagrama de flujo de la arquitectura de PIVlab.*



*Nota.* El diagrama presenta la secuencia del cálculo numérico de la velocidad superficial, comenzando por la entrada de imágenes hasta la obtención de resultados. Tomado de (Thielicke y Sonntag, 2021).

#### **2.2.4. Procesamiento de imágenes**

##### **a. Extracción de imágenes de videos**

RIVeR es una herramienta fundamental para extraer imágenes a partir de un video, dando al usuario la posibilidad de poder establecer la cantidad de imágenes a extraer. Un parámetro que logra calcular el campo vectorial es la velocidad de un río, ya que, si este es muy rápido no habrá partículas en común entre dos imágenes consecutivas, caso contrario cuando el flujo es muy lento no se notara un desplazamiento (Lobo, 2019).

##### **b. Estabilización de la imagen**

En la etapa de campo la estabilización de la imagen es un paso que no debemos obviar, ya que en el procesamiento podemos obtener resultados erróneos. En el caso de usar estaciones fijas es recomendable usar trípodes para las cámaras, sin embargo, las cámaras aéreas (drones) vienen implementada con sistemas de estabilización. Teniendo en cuenta todos esos cuidados se procede a la ortorectificación.

##### **c. Ortorectificación**

Las imágenes de la superficie del río son tomadas por cámaras fijas o aéreas, y no siempre esta es tomada perpendicular al flujo lo que lleva al proceso de ortorectificación. La corrección de imágenes se da para lograr obtener precisos datos. Para este proceso de ortorectificación es necesario la utilización de puntos de control ubicados sobre la superficie del terreno. Los puntos de control pueden ser árboles, esquinas, etc., la cual depende de la accesibilidad (Tamari, 2011).

##### **d. Mejora de la imagen**

El proceso para mejorar la imagen consiste en transformar a escala de grises con la aplicación de filtros, con el fin de reducir el costo computacional. Los filtros más usados son la el de CLAHE (acrónimo inglés de Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization); también el filtro de paso alto de intensidad, este último hace énfasis en los trazadores presentes en la imagen, suprimiendo cualquier forma de baja frecuencia (Patalano, 2017).

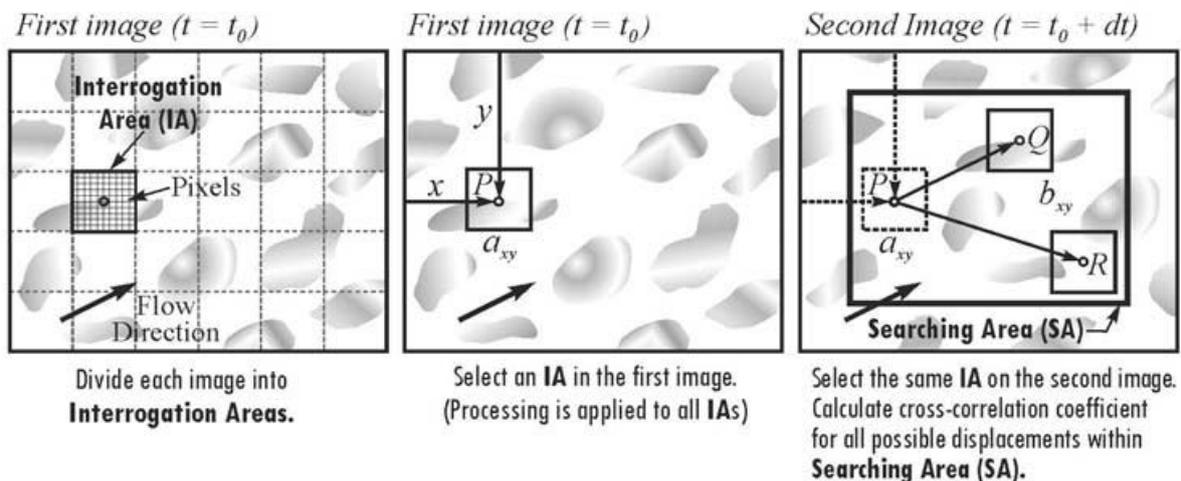
### 2.2.5. Evaluación de imágenes

Para determinar las velocidades, los algoritmos LSPIV son los mismos utilizados por el PIV convencional de imágenes de alta densidad (Muste et al., 2008). La evaluación de imágenes preprocesadas se evalúa mediante la aplicación de la velocimetría de imágenes (PIV). Esta técnica implica la generación de un campo vectorial que representa las velocidades de flujo a través de un determinado campo de visión. El propósito principal de estas técnicas de imagen es medir el desplazamiento de distintas características en el flujo (Sharif, 2022).

El concepto básico de la LSPIV es buscar patrones similares en la superficie de un río, por ejemplo, una ondulación en la primera imagen en el tiempo  $t$  y eso con un movimiento en la segunda imagen en el tiempo  $t + \Delta t$ . Por lo tanto, es necesario establecer una región de interrogación (IA) y una región de búsqueda (SA) tanto en la primera como en la segunda imagen. Luego, a partir del tiempo  $t + \Delta t$ , se puede establecer una IA en el SA de la segunda imagen mediante un movimiento progresivo y una comparación con la anterior (Liu et al., 2022). Después, de haber determinado la distancia que existe en medio de los centros de las respectivas ventanas pequeñas, puede calcularse la velocidad dividiéndola por la diferencia de tiempo ( $dt$ ) entre imágenes consecutivas. Este proceso de búsqueda se aplica sucesivamente a todos los IAs de la imagen (Muste et al., 2008).

**Figura 8**

*Conceptualización del algoritmo de tratamiento de imágenes LSPIV (los patrones de las imágenes suelen estar formados por partículas más pequeñas de la misma naturaleza, es decir, espuma, hojas o semillas artificiales añadidas a la superficie para recoger las mediciones).*



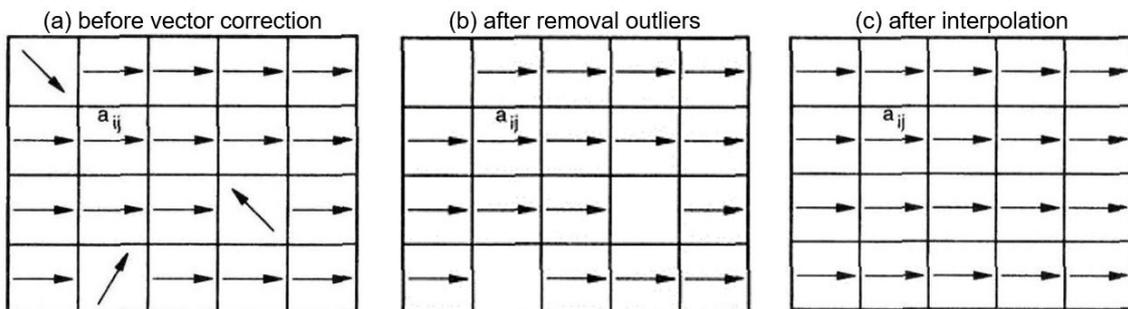
*Nota.* La imagen muestra el análisis de patrones en un flujo a través de la LSPIV. En la primera imagen se divide cada imagen en Áreas de interrogación y luego se selecciona una AI (El procesamiento se aplica a todas las AI). En la segunda imagen se selecciona una IA y se calcula el coeficiente de correlación cruzada para todos los desplazamientos posibles dentro del área de búsqueda (SA). Tomada de Muste et al. (2008).

### 2.2.6. Postprocesamiento

Jolley et al. (2021) clasifica el postprocesamiento de la LSPIV en dos elementos principales: la reducción de errores (por ejemplo, la corrección de vectores), y la aplicación de la velocimetría. La reducción de errores es el proceso de resaltar y filtrar posibles conjuntos de datos y campos de velocidad erróneos Figura 9, mientras que los resultados calculados de velocidad pueden ser aplicados a conjuntos de datos secundarios, como cuando se utilizan las velocidades superficiales para calcular el caudal (con la intervención de valores alfa e información batimétrica).

**Figura 9**

*Procedimiento general de corrección de vectores erróneos.*



*Nota.* La secuencia de imágenes muestra: (a) antes de la corrección vectorial, (b) tras eliminar los valores atípicos y (c) después de la interpolación. Imágenes tomadas de Fujita et al. (1998), según se cita en Sharif (2022).

### 2.2.7. Fuentes de error en LSPIV

#### a. Siembra de flujo

- **Tamaño del trazador**

Sharif (2022), menciona que no existe antecedentes claros sobre el tamaño que deben tener las partículas trazadoras, por lo que examinó las características de trazadores en 17 investigaciones; descubriendo que los diámetros del trazador utilizados en estos estudios de casos oscilaban generalmente entre 1 y 30 mm. Además, sugiere que las

partículas trazadoras deben tener un diámetro de al menos 1 o 1,5 píxeles (px) en las imágenes; el tamaño apropiado del trazador también está fuertemente influenciado por la resolución de la imagen y por la distancia existente de muestreo del suelo (GSD). Con base en la información anterior, concluyó que el tamaño del trazador es una fuente importante de incertidumbre y debe tenerse en cuenta al realizar los análisis LSPIV.

- **Densidad y homogeneidad de siembra**

La densidad y homogeneidad de la siembra de los trazadores debe tener un control exhaustivo para la estimación de la velocidad, ya que si estos no son detectables y trazables en la superficie del flujo puede generar vectores erróneos en la salida del campo de velocidad LSPIV. Asimismo, se recomienda que los trazadores deben cubrir entre el 10% y el 30% de la superficie de flujo para minimizar los errores de medición. Además, es esencial que los trazadores se distribuyan de manera homogénea por la superficie del agua; de lo contrario, LSPIV puede mostrar erróneamente velocidades bajas o nulos dispersos alrededor de los campos vectoriales generados (Sharif, 2022).

- **Visibilidad del trazador**

El trazador en la superficie del agua debe contrastar visualmente con el color del agua. Donde, el algoritmo PIV intenta estimar el desplazamiento de patrones distintos en el flujo calculando la función de correlación cruzada la cual se basa en valores de intensidad de los píxeles. Teniendo esto en cuenta, un alto contraste de las características de la superficie del agua favorece el proceso de evaluación de la imagen, ya que el algoritmo PIV es mucho más capaz de reconocer y rastrear las características en imágenes insuficientes, contrariamente a los trazadores que contrastan mal el fondo de la imagen tienden a inducir muchos errores en los resultados de LSPIV (Sharif, 2022).

- **Error de seguimiento**

Errores de seguimiento son aquellos en donde la partícula a ser desplazada no depende del flujo, sino que se encuentran bajo la influencia de los efectos del viento u otros procesos de superficie libre, creando una diferencia entre la velocidad real del agua y la velocidad de los trazadores. Este tipo de errores son notorios en las partículas trazadoras con baja gravedad específica, como la espuma y las burbujas de aire (Sciacchitano, 2019).

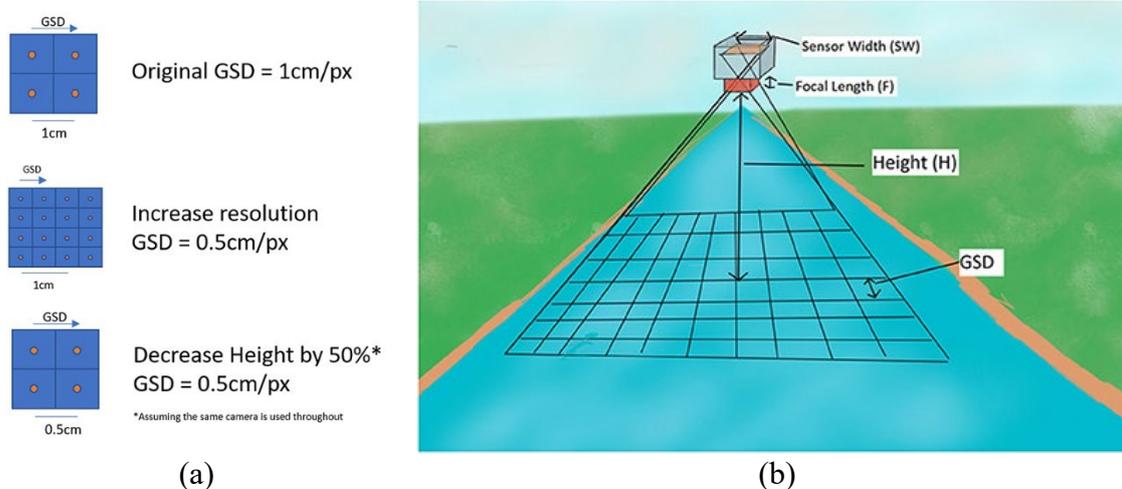
## b. Distancia de muestreo del suelo

La distancia de muestreo (GSD, Ground Sampling Distance, en inglés) del suelo puede ser una importante fuente de error, para lo cual se debe elegir cuidadosamente esta distancia, ya que a mayor altitud los trazadores ya no serán visibles. Sharif (2022) agrega que la GSD viene dada por la altitud de vuelo del dron y las especificaciones de la cámara. Una mayor altitud de vuelo del dron suele dar lugar a imágenes de resolución más gruesa con una distancia mayor. Si la GSD es demasiado grande (o las partículas trazadoras demasiado pequeñas), las características de la superficie del flujo pueden no ser resueltas por la cámara y el procedimiento LSPIV será menos preciso.

Como recomendación, se sugiere que la GSD se mantenga lo más reducida posible con el fin de optimizar el rendimiento de la LSPIV. No obstante, cabe destacar que Legleiter y Kinzel (2020) evidenciaron que una mayor resolución de imagen puede generar efectos adversos en la precisión de las mediciones LSPIV. Este fenómeno podría estar relacionado con el hecho de que los píxeles de la imagen son pequeños en comparación con el tamaño de las características superficiales con trazadores. Además, sus hallazgos indicaron que un aumento cuidadoso de la distancia podría tener un impacto positivo en la detectabilidad y trazabilidad de las características en la superficie del agua.

**Figura 10**

*Distancia de muestreo del suelo.*



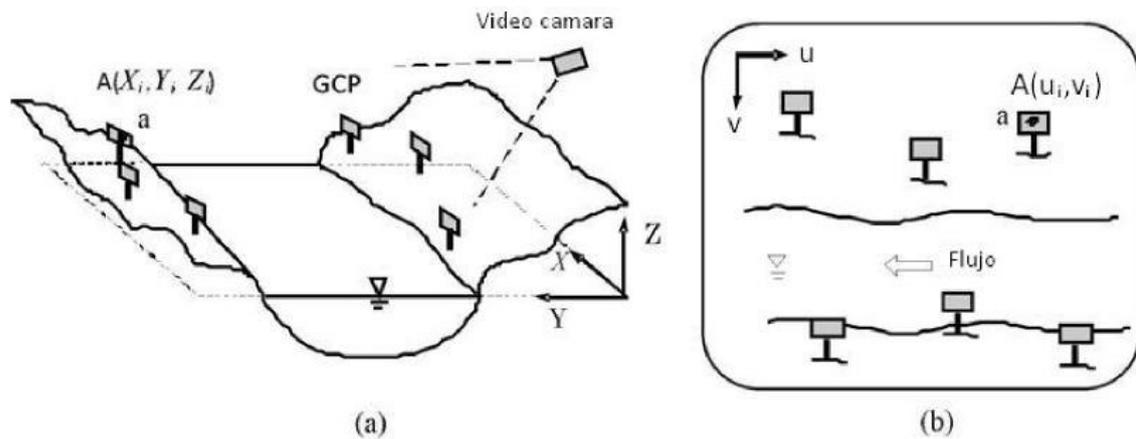
*Nota.* La figura (a) y (b) muestran la relación del tamaño en centímetros por píxeles. Tomado de Jolley et al. (2021).

### c. Ángulo de inclinación de la cámara

Tamari (2011), sostiene que “las imágenes de las superficies de los ríos son usualmente tomadas desde un puente o una margen del río usando un ángulo oblicuo en relación con el plano de la superficie del río” (p. 14). Para corregir la oblicuidad de estas imágenes se necesita puntos de ortorectificación, lo cual estarán en función del Angulo de inclinación (Figura 11).

#### Figura 11

Relación entre la cámara y el sistema coordenado del terreno. (a) Coordenadas reales ( $X, Y, Z$ ) y (b) coordenadas sobre la imagen ( $u, v$ )



*Nota.* Las imágenes muestran la ubicación de puntos coordenados para la ortorectificación de imágenes de muestreo, con la finalidad de obtener resultados reales. Tomada de Tamari (2011).

Tomar datos con la configuración de cámara oblicua respecto a la superficie del agua es una fuente importante de error, ya que puede introducir errores de medición importantes. Si se decide realizar una ortorectificación explícita, es importante recordar que la imagen transformada será menos precisa. El nivel de imprecisión que se introduce en la imagen tras la ortorectificación depende del ángulo de inclinación de la cámara (Shari, 2022).

### d. Factores medioambientales externos

Las fuentes de error analizadas en esta subsección están relacionadas con el sistema físico. Factores ambientales externos como la precipitación, la niebla, el viento, la falta de uniformidad de la iluminación y el deslumbramiento pueden afectar considerablemente al

rendimiento de la aplicación LSPIV (Jolley et al., 2021). La precipitación y la niebla inducen mucho ruido en la superficie del agua, haciendo que las imágenes sean inutilizables para las aplicaciones LSPIV. Además, la iluminación global y local de la superficie del agua influyen considerablemente en la calidad de velocidades basadas en imágenes (Hauet et al., 2008a). La iluminación global, o intensidad total de la luz solar, debe permitir una visibilidad adecuada de las características de la superficie. Por lo tanto, las imágenes no pueden tomarse en condiciones de poca luz, como al anochecer o por la noche. Además, la falta de uniformidad de la iluminación local, debida a la sombra y al resplandor de la luz solar, es también una importante fuente de error en la LSPIV (Hauet et al., 2008; Peña-haro et al., 2020). Por último, los drones solo pueden utilizarse en determinadas condiciones, por lo que deben evitarse a toda costa las precipitaciones y la niebla, ya que es difícil utilizar un dron en estas condiciones

#### **e. Otras fuentes de error**

- *Ruido de fondo* - En entornos fluviales al aire libre, el fondo no suele ser uniforme. En tales entornos, el ruido de imagen es prácticamente inevitable. Muchos factores diferentes pueden inducir ruido en las grabaciones de imágenes (por ejemplo, características del lecho en corrientes de agua clara). Esto podría provocar que la calidad de la imagen disminuya considerablemente y, por lo tanto, afecta a la usabilidad de las aplicaciones LSPIV.
- *Error de GCP* - Los errores de GCP, o errores de topografía, pueden derivarse de inexactitudes vinculadas con la determinación de las coordenadas del mundo real en los GCP durante la campaña de recolección de datos. Esto puede conducir a errores de transformación de la imagen y, por lo tanto, puede afectar a las mediciones LSPIV.
- *Área de interrogación* - En el software PIV se establece la magnitud de la área de interrogación específicamente durante la etapa que se procesa las imágenes. Asimismo, depende en gran parte del tamaño de las características de la superficie rastreada establecer la magnitud apropiada del tamaño de esta. Si el área de interrogación es demasiado pequeña, es posible que el algoritmo PIV no pueda detectar y rastrear estas características. Esto dará lugar a errores de medición.
- *Movimiento fuera del plano* - Los desplazamientos fuera del plano de las partículas ocurren comúnmente en flujos altamente tridimensionales. Dichos desplazamientos pueden provocar la pérdida de partículas detectables y, por lo tanto, pueden influir en el rendimiento del algoritmo PIV.

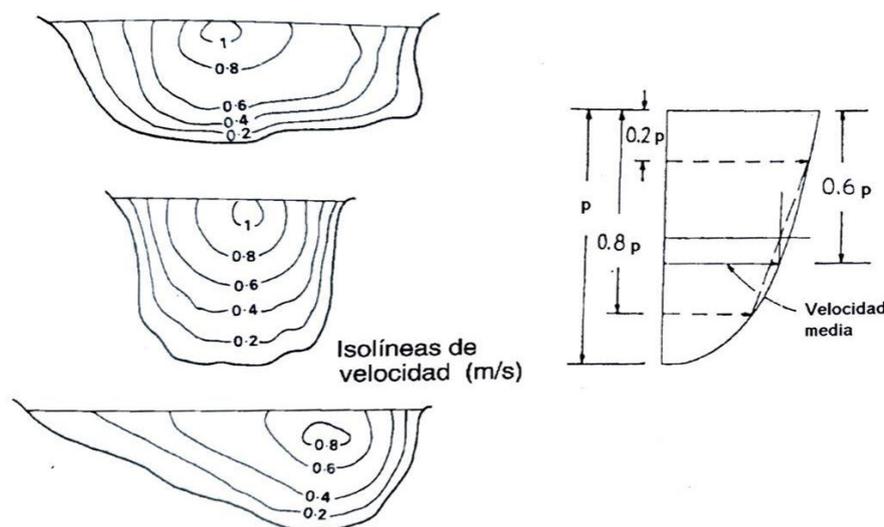
- *Frecuencia de muestreo* - O velocidad de fotogramas, se debe tomar con sumo cuidado, puesto que incide para el cálculo de la velocidad del río. Si la frecuencia de muestreo es excesivamente elevada, los desplazamientos de las partículas pueden llegar a ser excesivamente pequeños; conduciendo a un error significativo, ya que el algoritmo PIV puede ser incapaz de detectar los desplazamientos del trazador. Por otro lado, el movimiento de las partículas puede exceder el alcance del área de búsqueda, provocando la pérdida de correlación entre pares de imágenes si la velocidad de fotogramas es demasiado pequeña, (Pumo et al., 2021).

### 2.2.8. Velocidad superficial

La velocidad de la superficie, incluyendo su magnitud y dirección, es un indicador valioso de la condición de descarga de un río. Es de gran importancia obtener la medida de la velocidad de los ríos, dado que constituye un parámetro fundamental en el monitoreo hidrológico, lo que nos habilita para llevar a cabo estimaciones que son cruciales en la planificación de acciones preventivas. Se considera un proceso complejo lograr medir la velocidad de un río, puesto que involucra diversos métodos y tecnologías de medición disponibles (Huang et al., 2018).

**Figura 12**

*Variación de las velocidades del agua en una sección transversal del cauce, y cálculo de la velocidad media.*



*Nota.* La distribución de velocidades es variable a lo largo de la sección de medición en donde estas tienden a ser mayores en el centro de la sección y menores al borde del río. Tomado de González y García (2011).

La velocidad del agua varía en diferentes segmentos de medición. Estas velocidades tienden a ser mínimas cerca de las orillas del cauce, dado que en esa zona se presenta una mayor rugosidad. Por otro lado, las velocidades máximas se registran en el centro de la sección de medición, pudiendo obtener la velocidad media a una distancia de 0.6 de la profundidad (González y García, 2011).

Asimismo Liu et al. (2021) reitera, la velocidad superficial es una variable significativa en las observaciones hidrológicas de los ríos y se utiliza en la estimación del caudal. Por lo general, las observaciones de velocidad se limitan a estaciones hidrométricas e instrumentos de medición intrusivos.

Para determinar la velocidad superficial se recomienda el uso de correntómetros ópticos o mediante flotadores. Se efectúa con correntómetro la medida de la velocidad subsuperficial considerando una distancia por lo menos de 2 pies por debajo de la superficie para evitar las perturbaciones superficiales. Este tipo de mediciones de velocidad se usan en corrientes rápidas (Turnipseed & Sauer, 2010).

#### **a. Definición**

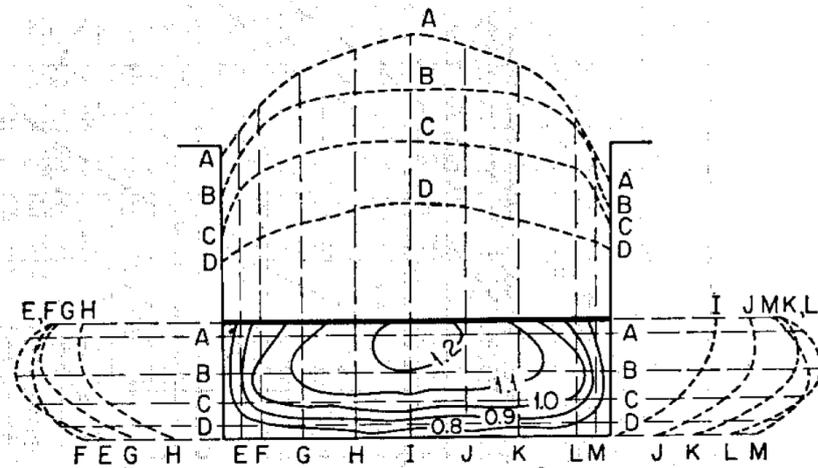
La velocidad del flujo se describe como un “vector que, en un punto dado, indica la magnitud y dirección del movimiento de un líquido” (Organización Meteorológica Mundial, 2012). Complementariamente, Flores (2018) explica que la velocidad hace referencia en determinar la relación a través de una distancia que se desplaza el agua en un intervalo de tiempo transcurrido.

#### **b. Distribución de velocidades en una sección de canal**

La velocidad superficial no se distribuye de manera uniforme en una sección. Las velocidades máximas se producen debajo del espejo de agua a una distancia de 0.05 a 25 del tirante de agua. Además, cuando más cerca está a la orilla, la máxima velocidad se encuentra a mayor profundidad (Chow, 1994).

**Figura 13**

*Distribución de velocidades en un canal rectangular.*

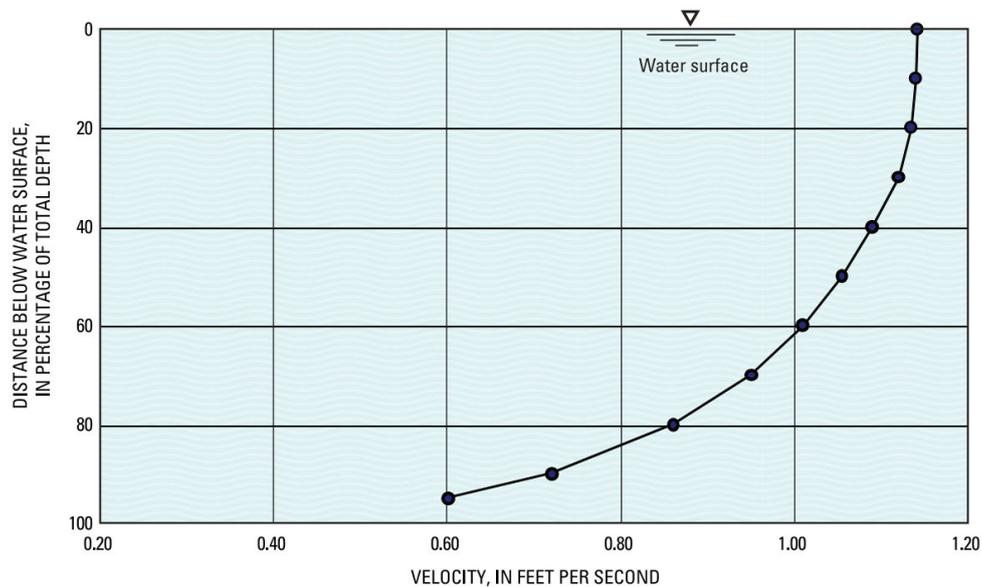


*Nota.* Comportamiento de velocidades en una sección de un canal rectangular, tomado de Chow (1994).

Determinar la velocidad vertical es importante para observar el comportamiento en puntos específicos de una sección de medición (Turnipseed & Sauer, 2010).

**Figura 14**

*Curva típica de velocidad vertical.*



*Nota.* El perfil de velocidades verticales indica la profundidad óptima a la que debe sumergirse el correntómetro para medir con precisión la velocidad subsuperficial, tomado de Turnipseed & Sauer (2010)

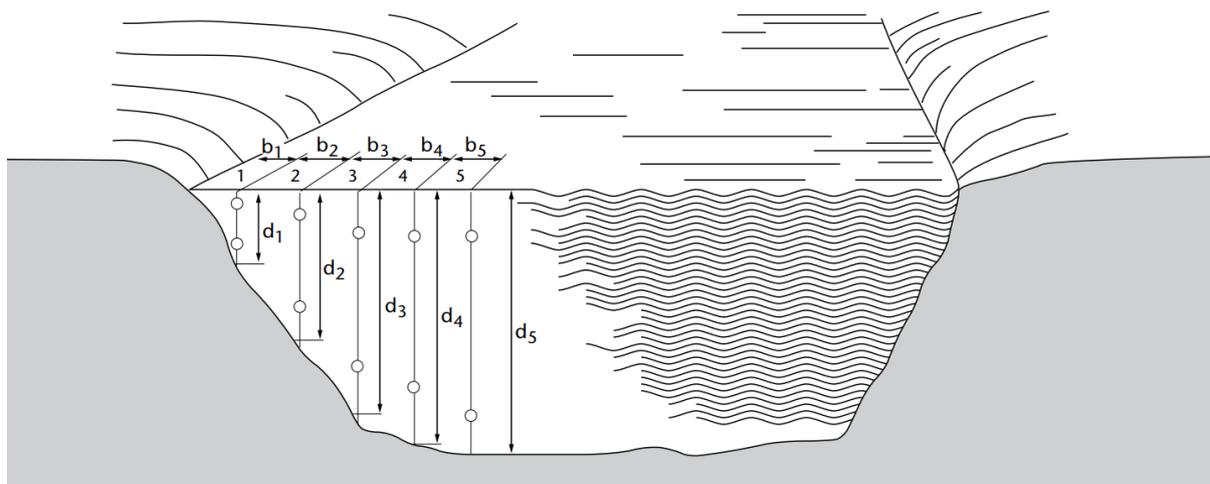
### c. Sección de medición

Medir con exactitud las variables de monitoreo hidrológico como el caudal (dependiente del área y la velocidad de la sección de medición) está ligada al número de verticales de observación porque en ella se medirá la profundidad y la velocidad. Se colocará las verticales de tal forma que defina la geometría del fondo del río y la variación horizontal de la velocidad (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

El ancho del río y la distancia entre verticales  $b$  se establecen con una distancia medida desde un punto de referencia fijo en el margen del río, este se situará en el mismo plano de la sección de medición. La longitud entre verticales se ubica con cintas o cordeles graduados extendidos a lo largo del ancho del cauce. Asimismo, y la profundidad  $d$  de las verticales son medidas a través de reglas graduadas.

### Figura 15

*Vista de una sección transversal de un río, en la que figura la posición de los puntos de observación.*



*Nota.* La figura muestra la distancia  $b_n$  entre las verticales de medición, además la profundidad  $d_n$ , profundidad entre el nivel de agua y el lecho del río. Tomada de la Organización Meteorológica Mundial (2012).

### d. Ancho del río

Se define, a la medida del ancho un río a la longitud existente entre las orillas en una sección específica, siendo más preciso al referirse al ancho del espejo de agua. Es importante destacar que los ríos no exhiben un ancho constante, sino que tienden a variar a lo largo de su curso.

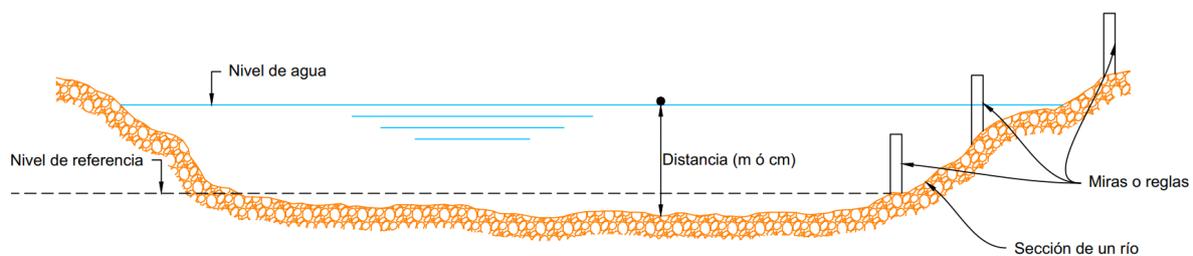
Este cambio en la amplitud del río se puede dar por múltiples razones, como es el caso de la topografía del terreno, presencia de obstáculos naturales o por la estacionalidad de las precipitaciones. En consecuencia, la fluctuación en el ancho del río es una característica dinámica que refleja la complejidad y la cambiante naturaleza de estos cuerpos de agua a lo largo de su recorrido.

#### e. Profundidad del río

Determinar la profundidad o nivel de agua de un río, es un proceso sencillo, se trata de la longitud que parte desde un nivel de referencia o el fondo del río hasta la superficie del agua. Esta medida se expresa en metros o centímetros y Figura 16 (Monsalve, 1999).

#### Figura 16

*Medición del nivel de agua en un río mediante una estación limnimétrica.*



*Nota.* Proceso de medición del nivel del agua a través de miras o reglas, la que se denomina estación limnimétrica. Adaptada de Monsalve (1999).

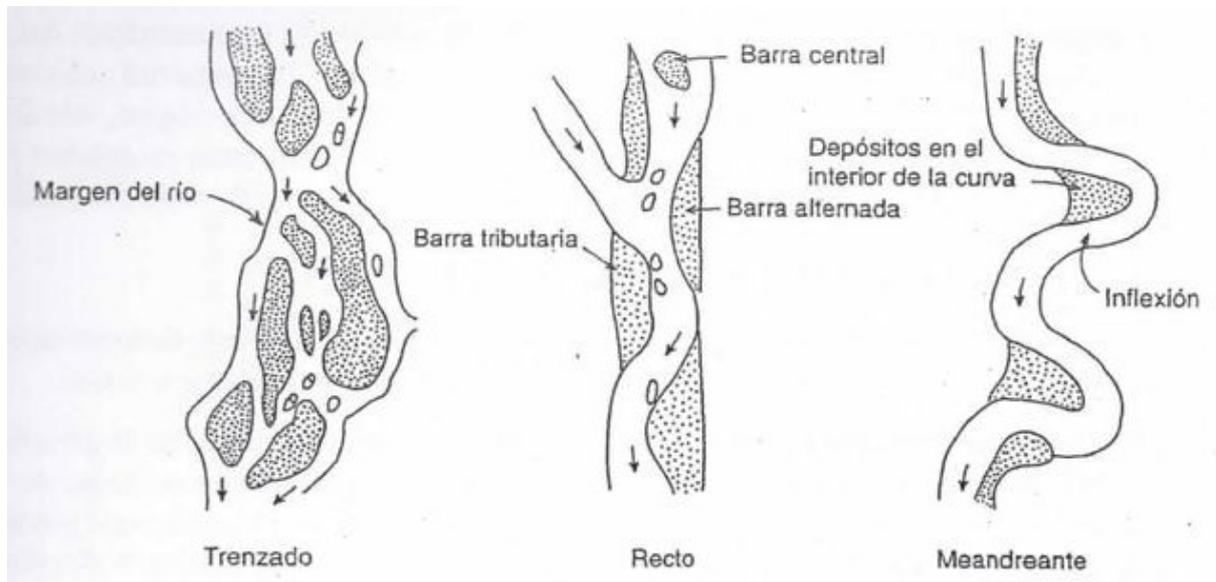
Esta medida es esencial para comprender los cambios producidos en el nivel del agua, así como su impacto en la dinámica del río, la cual suministrar información para el monitoreo de inundaciones, diseño de estructuras hidráulicas y la gestión adecuada de recurso hídricos.

#### f. Clasificación de los ríos según su geometría

En la naturaleza, la geometría de los ríos suele tener tres formas: rectas, trenzadas y meandreantes. Los ríos rectos mantienen una alineación recta y se ubican en terrenos que no son adecuados para permitir velocidades erosivas, o en inclinaciones significativas donde se pueden llegar a velocidades elevadas. No obstante, los ríos trenzados son aquellos compuestos por canales interconectados aleatoriamente, divididos por barras, que presentan el aspecto de una trenza, mientras que los ríos con meandro son aquellos donde su comportamiento se manifiesta a través de varias curvas sucesivas (Apaçlla, 2014).

## Figura 17

*Tipos de ríos de acuerdo con su geometría.*



*Nota.* La imagen muestra el comportamiento de los ríos según su clasificación, tomado de Apaella (2014).

### **g. Tipos de ríos de acuerdo con el caudal y la carga de sedimentos**

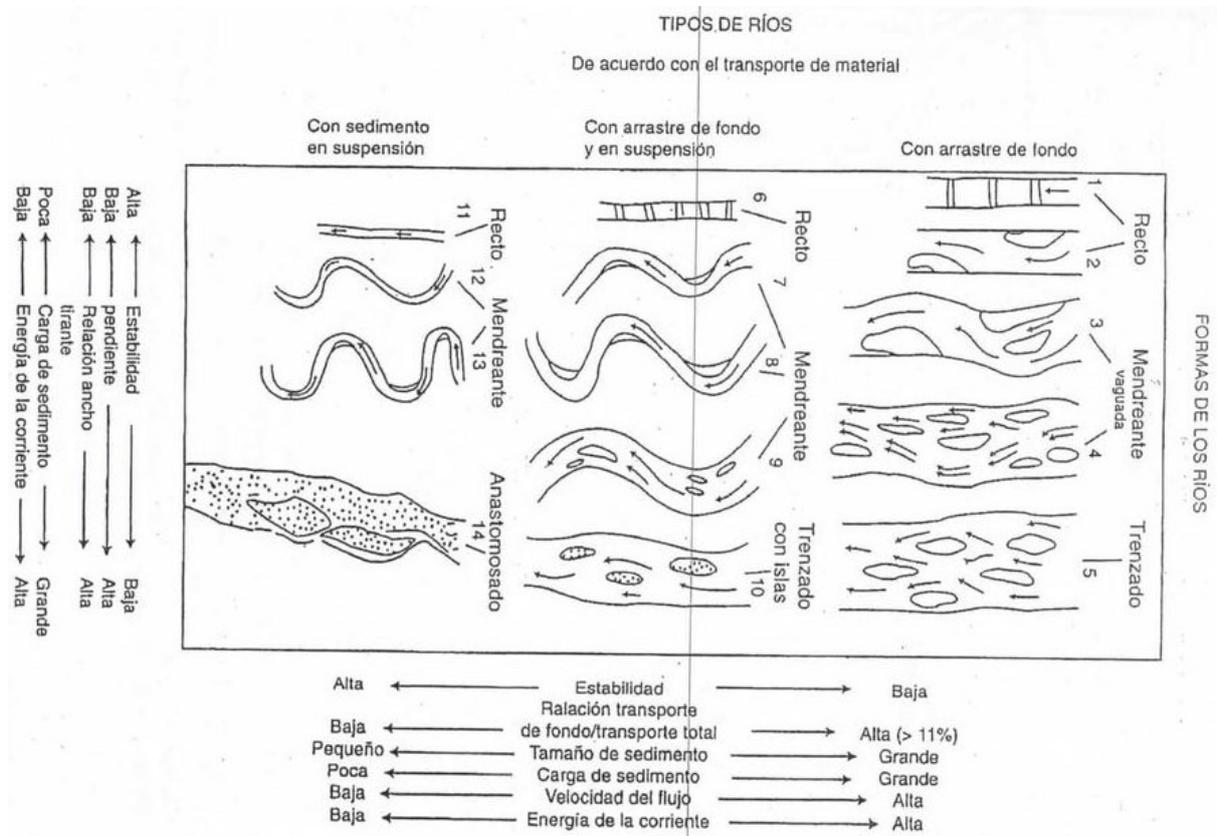
En 1981, Schumn categorizó catorce tipos de patrones de ríos basándose en parámetros de caudal y cantidades de sedimentos transportado, los cuales se presentan en la Figura 18 (Apaella, 2014).

### **h. Clasificación de los ríos según su edad**

Primero los ríos jóvenes se forman cuando la superficie del suelo ha sido erosionada por el agua. Sus cauces siguen la misma estructura y se componen de materiales fracturados que pueden o no tener capacidad de erosión. Gran parte de los ríos montañosos y sus tributarios son modelos de ríos jóvenes. Los ríos maduros, su principal característica es que el valle fluvial se expande, la pendiente del río es suave y la erosión de los márgenes tiene un mayor impacto que la erosión en el fondo. Los ríos viejos se expanden en el tiempo de los ríos maduros. Conforme la erosión persiste, los valles de los ríos se expanden hasta convertirse en zonas de mayor ancho y menor inclinación (Apaella, 2014).

**Figura 18**

*Tipos de ríos de acuerdo con el caudal y el material transportado.*



*Nota.* La figura muestra los catorce patrones del caudal y sedimentos transportados según Schumm, tomado de Apaella (2014).

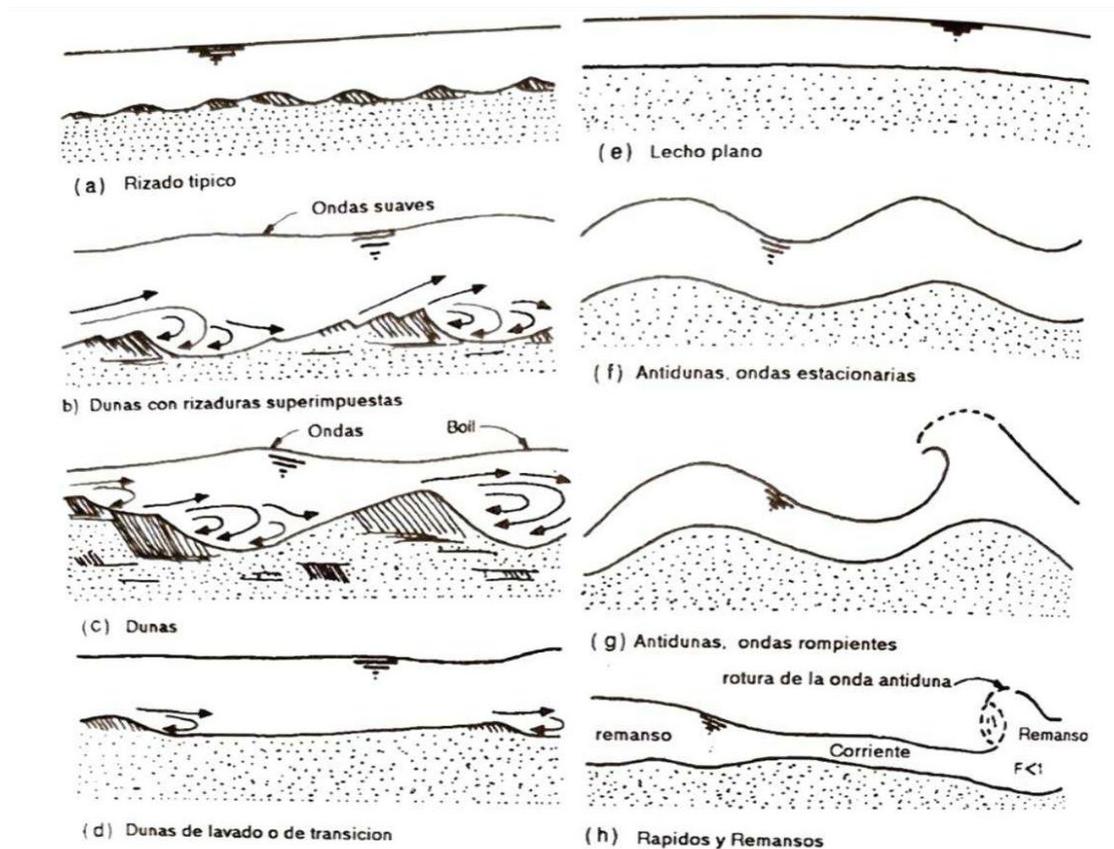
**i. Forma del lecho del río**

La forma del lecho del río resalta en la topografía del fondo del río, es decir la configuración y la estructura de la superficie del lecho del agua. Asimismo, Flores (2018) agrega que el lecho de río “es la parte de un valle por donde discurre agua superficial, este está confinado por paredes naturales denominadas riberas” (p. 6).

Los fenómenos de erosión y sedimentación en los ríos generan diferentes formas estructurales del lecho, donde las partículas se redistribuyen creando depósitos que pueden encontrarse de manera más o menos regular, alternadas con áreas sin acumulaciones. En los tramos o ríos con presencia de arena, se desarrollan las denominadas rizaduras, dunas, lecho liso o antidunas, dependiendo del tipo de régimen del caudal (desde subcrítico a supercrítico), como aparece representado en la Figura 19. (Gonzales y García, 2001)

**Figura 19**

*Formas del lecho en ríos arenosos.*



*Nota.* La forma del lecho en ríos es muy diversa; formando dunas, antidunas, rápidos y remansos entre otros. Tomado de Gonzales y García (2001).

### 2.2.9. Instrumentos de monitoreo fluvial

Los dispositivos de monitoreo hidrológico en cauces de agua nos facilitan la medición de la velocidad de flujo en determinados puntos. Entre los instrumentos más utilizados con este objetivo se tiene el correntómetro, flotador, ADV (Velocímetro acústico Doppler), ADCP (Perfilador Acústico de Corriente Doppler), entre otros.

#### A. Flotador

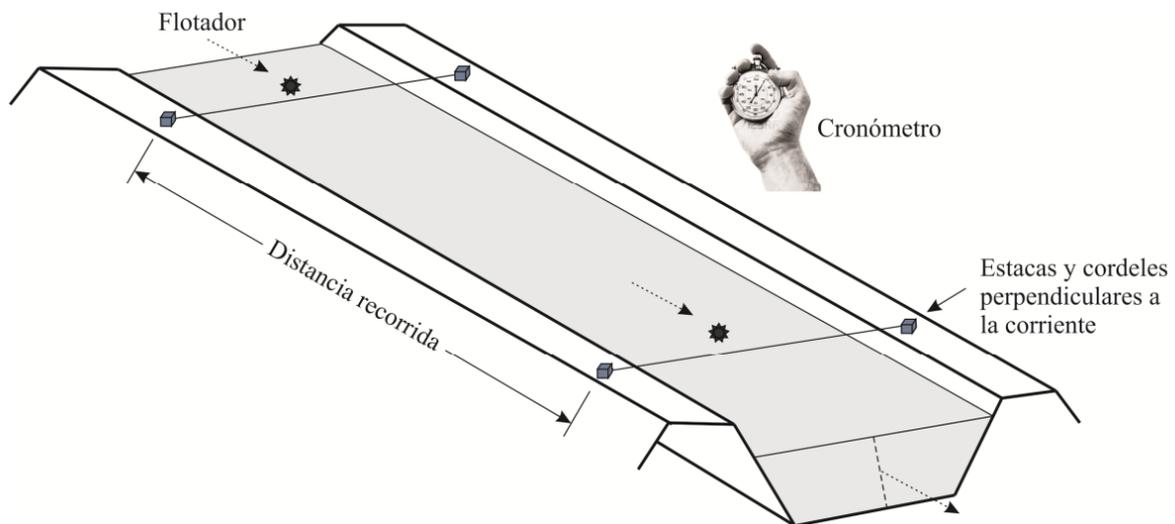
El método del flotador se emplea para la medición de la velocidad del flujo en lugar de determinar el caudal de manera directa. Los flotadores, consistentes en objetos más leves que el agua, tales como un fragmento de madera, una pelota o una esponja, se encuentran suspendidos y llevados por el agua, moviéndose a una velocidad parecida a la de la superficie. Este método encuentra su aplicación principal en la medición de canales y pequeños ríos.

Aunque los flotadores ofrecen una estimación del flujo, su uso se justifica en situaciones en las que no se demanda una precisión elevada o cuando adquirir equipos de medición más exactos no resulta viable desde el punto de vista económico (Ortega, 2012).

El autor mencionado sostiene que, al medir ríos con este método, además de utilizar flotadores, también es necesario utilizar relojes (cronómetros), cintas métricas y reglas para medir distancias y áreas hidráulicas. En el proceso de medición, se anota el tiempo que toma el flotador para atravesar una distancia establecida (usualmente 10 metros) que se ha marcado anteriormente como un segmento lineal y homogéneo. Esta sección se selecciona para la observación durante toda la prueba, como se muestra en la Figura 20.

### Figura 20

*Medición de la velocidad superficial del agua con el método del flotador.*



*Nota.* Uso del método del flotador para medir la velocidad superficial del flujo. Tomado de Ortega (2012).

El flotador se libera repetidamente metros arriba de la sección de medición, registrando el tiempo de desplazamiento para lograr un promedio. Después, se calcula la velocidad superficial con la relación entre la distancia recorrida y el lapso de tiempo en que el flotador empleó en recorrerla.

### B. Correntómetro

Los molinetes o correntómetros deben ser calibrados para abarcar el rango de velocidades de flujo que se desea medir. Esta calibración puede realizarse de forma individual o mediante un sistema de valoración clasificatorio. En el caso de los medidores calibrados por separado, se

recomienda realizar una recalibración cada tres años o cada 300 horas de uso, o cuando su funcionamiento genere sospechas (Organización Meteorológica Mundial, 2020).

Asimismo, la Organización Meteorológica Mundial, menciona que la medición de la velocidad mediante el molinete se realiza mediante el recuento de las revoluciones del rotor durante un lapso de al menos 30 segundos. Si la velocidad sufre pulsaciones de larga duración, el tiempo de exposición aumentará de manera correspondiente.

En corrientes de agua de poca profundidad, el sensor de velocidad se sostiene en la posición requerida a través de una barra de molinete. No obstante, cuando los canales son excesivamente profundos o la corriente es demasiado rápida para ser traspasados, se introduce el dispositivo desde un puente o barco con la ayuda de una varilla o cable. Si se emplea una barca, se garantiza que el dispositivo de medición no sea perjudicado por las alteraciones del flujo natural provocadas por el barco. Previo al inicio de las mediciones, se asegura que el molinete se ajuste a la dirección del flujo una vez colocado en el lugar elegido de la vertical. En caso de que el flujo sea oblicuo, se procede a medir el ángulo  $\gamma$  que se forma por la dirección del flujo normal a la sección transversal y se procede a corregir la velocidad medida utilizando la fórmula:

$$V_{normal} = V_{medida} \cos \gamma \quad (8)$$

El molinete suspendido de un cable se dirigirá automáticamente en la dirección de la corriente debido a las veletas que contiene. En circunstancias como la utilización de un puente oblicuo como sección de medición, se ajustarán las distancias horizontales mediante la fórmula:

$$d_{normal} = d_{medida} \cos \gamma \quad (9)$$

A intervalos regulares, el molinete se sacará del agua para ser examinado. Para cuantificar velocidades extremadamente bajas, se pueden emplear molinetes especiales que han sido evaluados para el rango de velocidades requerido, con el objetivo de confirmar la repetibilidad y exactitud de las observaciones.

Es crucial recordar que el eje horizontal del molinete no debe situarse a una distancia que no sea menor a una vez y media la altura del rotor con relación a la superficie del agua, ni a una distancia que sea menor a tres veces la altura del rotor desde el borde del canal. Además, todas las componentes del molinete deben estar inmersas en agua.

- Medidores ultrasónicos y otros métodos
- Ventajas y limitaciones de las técnicas tradicionales

### Figura 21

*Correntómetro Digital Global FP111 Flow Probe Current Meter forma parte de la destacada línea de productos Global Water, bajo la reconocida marca Xylem.*



**Medidor digital portátil de velocidad de agua -  
FP111**



Pantalla digital



Te giratoria opcional



Hélice de sonda de caudal con sensor  
magnético

*Nota.* El correntómetro Digital Global FP111 Flow Probe Current Meter, está compuesto por una hélice de aspas, pantalla o contador digital y un soporte tipo regla. Adaptado de Xylem Australia (2020).

Un correntómetro o molinete es un dispositivo que tiene una rueda con unas aspas que, al ser sumergido en el agua estas roten de manera proporcional a la velocidad. Los molinetes o correntómetros han evolucionado significativa en concordancia con el progreso tecnológico. Estos dispositivos constan de tres componentes fundamentales: una hélice de aspas, cuyo movimiento es provocado por el flujo del agua; este registra la cantidad de rotaciones de la hélice en diferentes intervalos predefinidos y, además, cuentan con un soporte que posibilita sumergir el molinete a la profundidad deseada (Ortega, 2012).

### **C. Velocímetro acústico Doppler (ADV)**

Un velocímetro acústico Doppler (ADV) está basado en el efecto Doppler, concepto relacionado con el cambio relativo de la frecuencia del sonido a medida que se acerca o se aleja de un observador. Si un observador está inmóvil mientras pasan las ondas sonoras, pasarán  $n$  ondas durante un intervalo de tiempo  $t$ . Si el observador camina hacia la fuente de sonido, pasarán más de  $n$  ondas durante  $t$ . Del mismo modo, si el observador se aleja de la fuente de sonido, pasarán menos de  $n$  ondas durante  $t$ . El desplazamiento Doppler es la diferencia entre la frecuencia que se oye cuando el observador está inmóvil y la frecuencia que se oye cuando el observador se acerca o se aleja del sonido (Neill y Hashemi, 2018). Se define como:

$$f_d = f_s(V/C) \quad (10)$$

Donde

$f_d$  : Desplazamiento Doppler

$f_s$  : Frecuencia del sonido cuando tanto la fuente y el receptor están estacionarios

$V$  : Velocidad relativa entre la fuente y el receptor

$C$  : Velocidad del sonido

Asimismo,  $C$  está dada por:

$$C = f\lambda \quad (11)$$

Donde

- $f$  : Frecuencia
- $\lambda$  : Longitud de onda

Conforme al autor mencionado con anterioridad, se destaca que un ADV transmite sonido a una frecuencia fija y escucha los ecos que devuelven los dispersores de sonido en un pequeño volumen de agua: pequeñas partículas que reflejan el sonido de vuelta al instrumento. Aunque el sonido se dispersa en todas direcciones, una pequeña parte se refleja en el transductor. El ADV se basa en el supuesto de que estos dispersores se desplazan con la misma velocidad que el agua. Dado que el ADV transmite y recibe sonido, el desplazamiento Doppler se duplica, por lo que la ecuación 12 se convierte en:

$$f_d = 2f_s(V/C) \quad (12)$$

Asimismo, el autor señala, que el desplazamiento Doppler solo funciona con el movimiento radial. Aunque el movimiento angular cambia la dirección entre la fuente y el receptor, no altera la distancia que los separa, por lo que no causa un desplazamiento Doppler. Limitando el desplazamiento Doppler a la componente radial, la ecuación 13 se convierte en:

$$f_d = 2f_s(V/C) \cos A \quad (13)$$

Donde

- $A$  : Ángulo entre el vector velocidad relativa y la línea entre el ADV y los dispersores

La onda acústica reflejada se mide mediante tres sondas receptoras Figura 22. Los cambios en la frecuencia de las señales reflejadas son el indicador de las velocidades en tres direcciones, correspondientes a las tres sondas receptoras. Un ADV estima los tres componentes de la velocidad (es decir, en las direcciones x, y, z) basándose en estos datos. Los ADV se diseñan con distintas frecuencias de señal, adecuadas para distintos rangos de velocidades de corriente.

## Figura 22

*ADV SonTek de 10 MHz.*



*Nota.* El Velocímetro Acústico Doppler (ADV) de 10 MHz es un dispositivo altamente preciso y versátil diseñado para medir la velocidad del agua en 3D. Este instrumento se adapta a diversas configuraciones (laboratorio, ríos y hasta océanos). Tomado de (Neill y Hashemi, 2018).

### **D. Perfilador acústico Doppler de corrientes (ADCP)**

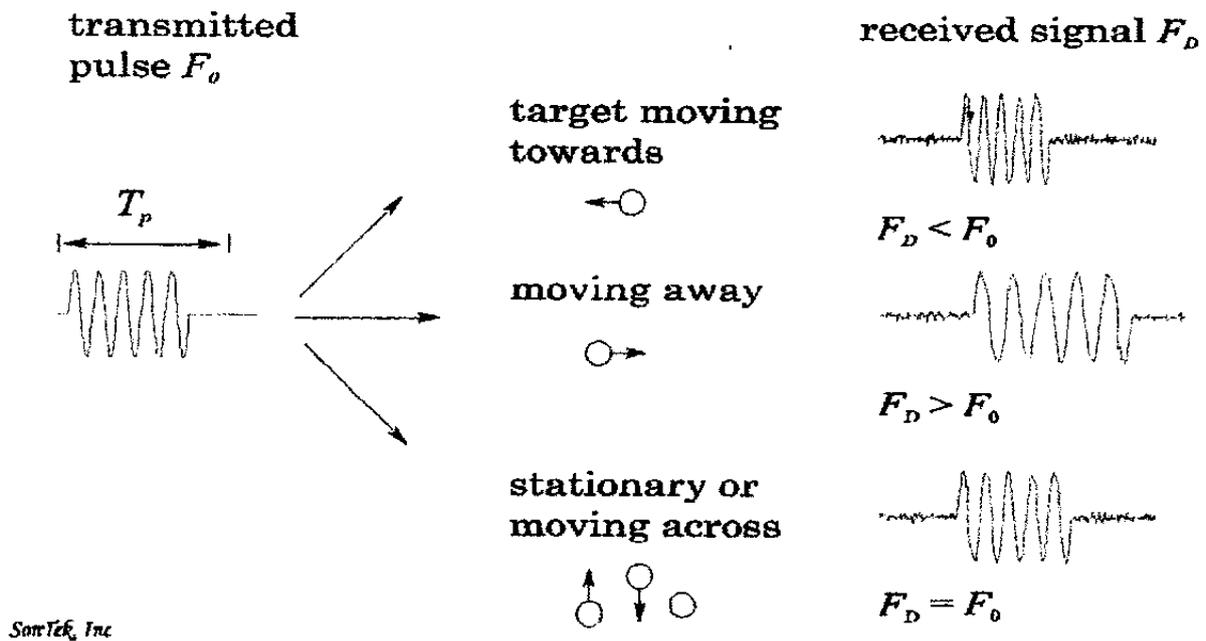
El perfilador de corrientes Doppler acústico es un método de área-velocidad, que implica el uso de una embarcación para atravesar un río, llevando a cabo una única medición de la descarga y generando así una curva de gasto. El ADCP (Acoustic Doppler current profiler), por sus siglas en inglés, mide la velocidad, profundidad y posición en una sección transversal a medida que atraviesa un río. La velocidad se determina por el principio Doppler, mientras

que el área se calcula siguiendo el lecho del río para determinar la profundidad y la posición de la embarcación (Herschy, 2009).

Asimismo, el autor citado, menciona que según el principio Doppler, el desplazamiento de las partículas de sedimento en movimiento o la presencia de burbujas de aire en la corriente provoca modificaciones en la frecuencia aparente de las ondas sonoras. Esta diferencia de frecuencia entre las ondas sonoras transmitidas y reflejadas es una medida de la velocidad relativa del flujo, tanto en magnitud como en dirección, y se conoce como desplazamiento Doppler Figura 23. Un ADCP se asemeja a la forma de un cilindro con un cabezal transductor en el extremo, la cual se constituye de tres o cuatro transductores con sus caras inclinadas hacia la horizontal y en ángulo recto entre sí.

**Figura 23**

*Desplazamiento Doppler: el efecto Doppler es un suceso que implica un desplazamiento de frecuencia. El supuesto cambio aparente en la frecuencia de las ondas sonoras se origina debido a la reflexión de estas por partículas en movimiento.*



*Nota.* La figura esquematiza el comportamiento de las ondas en diferentes condiciones, ya sea cuando los objetos se desplazan en dirección al origen del pulso transmitido o en sentido contrario, así como cuando se encuentran inmóviles o en movimiento. Tomado de (Herschy, 2009).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2018), en su manual sobre hidrometría, resalta la efectividad de los correntómetros hidroacústicos, respaldados por la tecnología Doppler. En un principio fue diseñado para monitorear corrientes marinas, posteriormente para aforar ríos grandes, en la actualidad existen equipos en el mercado que permiten aforar ríos pequeños. Estos equipos permiten obtener lecturas rápidas de las velocidades segmentadas en celdas con dimensiones definidas en la sección de medición. Además, cuenta con un software que facilita la visualización de resultados de calidad con una manipulación sencilla.

La recopilación de datos o aforo mediante estas tecnologías se usan desde carros huaro, botes pequeños, puentes y deslizadores, como se evidencia en la Figura 24.

### **Figura 24**

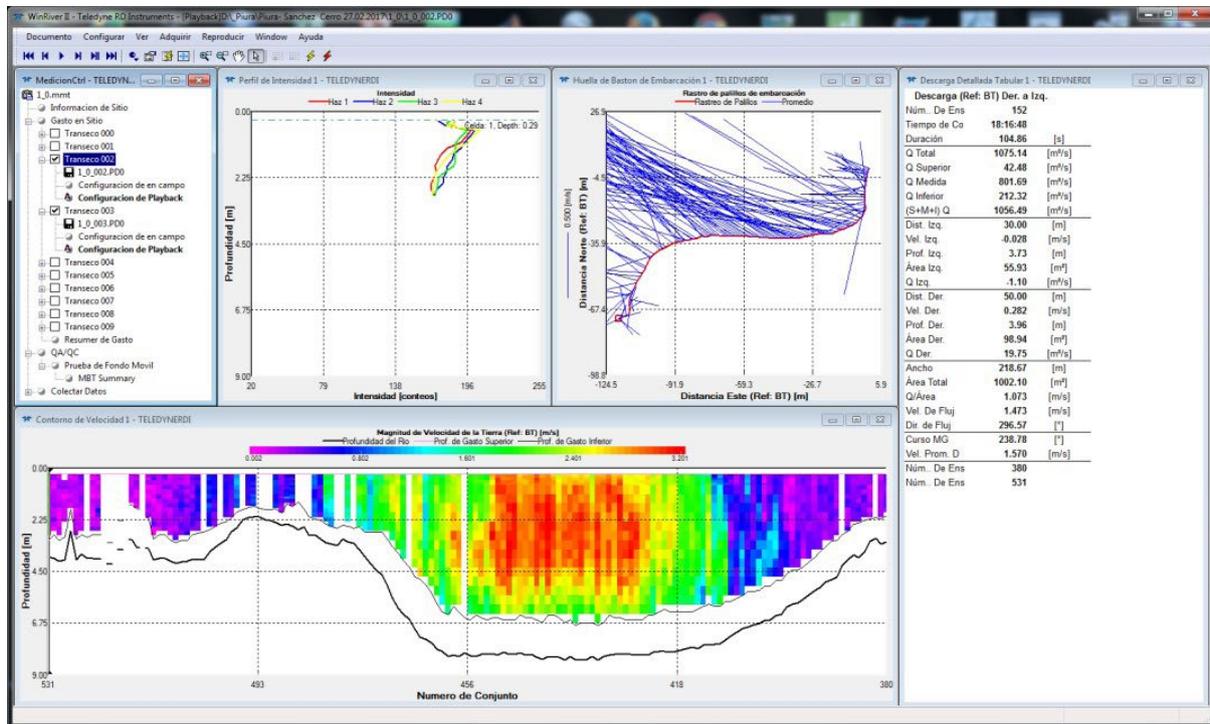
*Aforo con ADCP M-9 desde embarcación con motor fuera de borda en el río Piura.*



*Nota.* La fotografía muestra el empleo de una embarcación para la recolección de datos mediante ADCP M-9, en el río Piura. Tomado de (SENAMHI, 2018).

**Figura 25**

*Pantalla gráfica de visualización de resultados del aforo con ADCP M-9 en el río Piura.*



*Nota.* La ventana gráfica de la figura corresponde al software WinRiver II de Teledyne RD Instruments, y en ella se ilustran los resultados obtenidos durante una campaña de medición. Tomado de (SENAMHI, 2018).

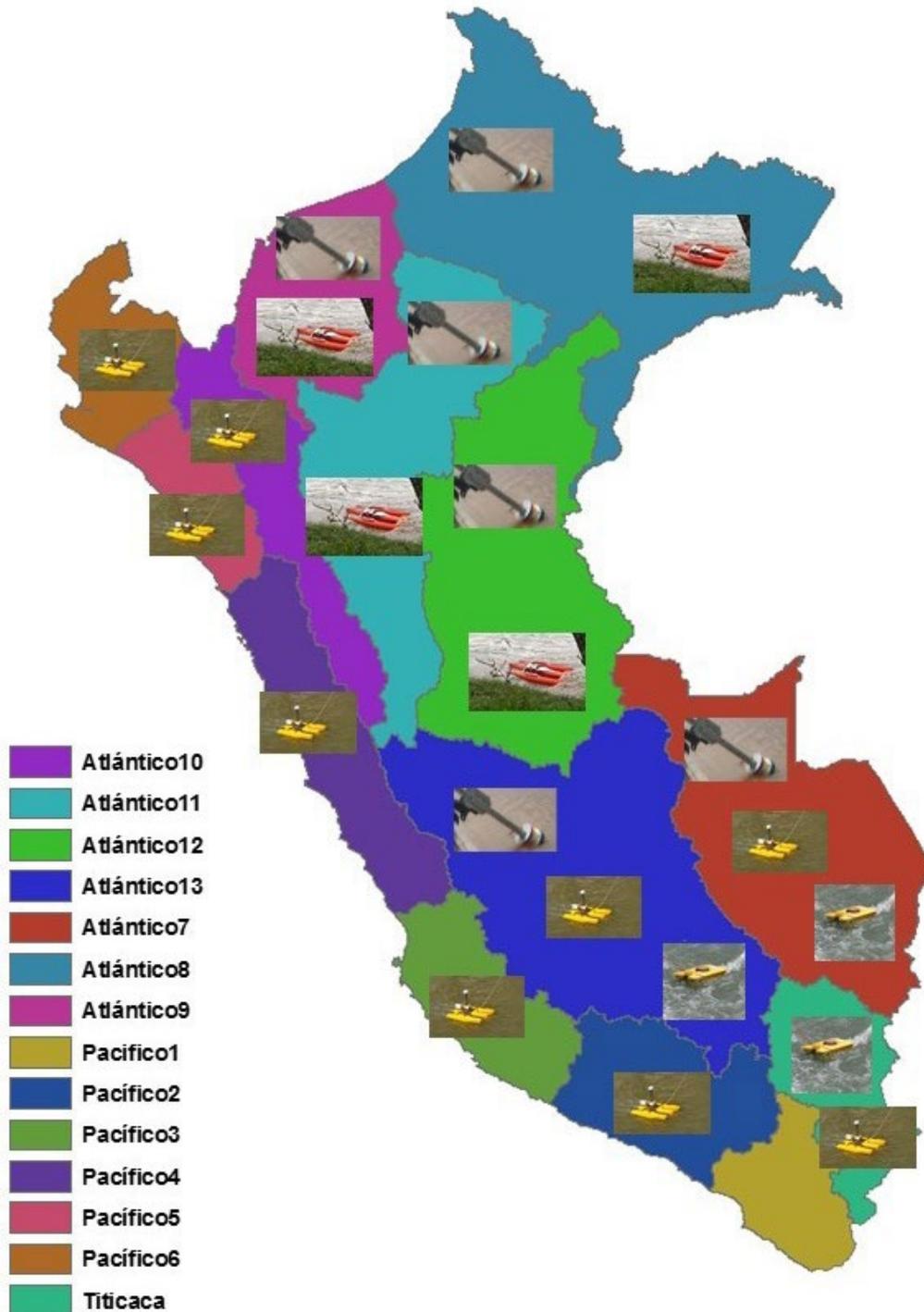
Además, SENAMHI (2014), publica el manual, para utilizar el perfilador acústico de efecto Doppler (ADCP) multifrecuencia SonTek M-9, donde se detallan los procedimientos a ejecutar para llevar a cabo las mediciones hidrológicas:

- *Indicaciones previas a las actividades de campo:* elaborar un checklist donde se incluya la revisión de baterías (de los dispositivos móviles de datos ADCP), herramientas, la embarcación con sus accesorios, sogas o componentes de transporte de la embarcación (cuando no este tripulada) y otros. El equipo requiere por lo menos de tres trabajadores para trasladar el barco y su equipo de un lado al otro dos trabajadores y otro trabajador adicional para operar los equipos de recepción (computadora o celular).
- Definir la sección de aforo, esta debe ser estable y tener buena accesibilidad, con la finalidad de utilizar el instrumento desde las orillas y/o desde los puentes.
- El ADCP debe ser armado e instalado en la embarcación conjuntamente con los módulos de energía, comunicación y GPS.

- El instrumento debe ser parametrizado con el software del equipo, donde permite obtener la declinación magnética, sumergencia del perfilador, entre otras características particulares de la zona de medición.
- Para que el equipo sea capaz de realizar modificaciones de posición ante balanceos y cabeceos de la embarcación es necesario calibrar la brújula.
- La embarcación debe ser ubicada en la orilla del río de manera conjunta con todo el equipo.
- Realizar al menos 4 mediciones de la sección de medición desde los márgenes del río y/o puentes. Se debe mantener la velocidad y dirección de la embarcación, esto permite obtener tirantes y velocidades para determinar el caudal del río. El cálculo final del caudal se determina de la media de las 4 mediciones.
- Cuando se efectúa las 4 mediciones, tener en cuenta que se debe mantener una velocidad constante de la embarcación para que los datos recolectados no sean alterados. También, se recomienda que se debe mantener un ritmo constante de la embarcación y a la vez que esta sea inferior a la velocidad del agua para que el error relativo sea lo más significativo posible.
- Cuando las condiciones de estudio son peligrosas y no permite llegar a la otra orilla del río, se recomienda tener un bote para trasladar a las personas de un lado a otro del río.
- Al introducir la sonda paramétrica en el agua es suficiente para determinar la temperatura y la conductividad del agua. Las mediciones habitualmente se llevan a cabo desde una orilla del río.

**Figura 26**

*Regiones hidrológicas del Perú donde el SENAMHI realiza aforos con diferentes equipos ADCP.*



*Nota.* SENAMHI ha estado implementando estaciones de medición hidrométrica en diversos ríos de las cuencas del Pacífico, Atlántico y Titicaca, mediante el empleo de instrumentos Doppler. Tomado de (SENAMHI, 2018).

### E. Pistola radar de velocidades

Son equipos no intrusivos, que que facilitan la medición de la velocidad superficial del flujo de agua. Adicionalmente, los velocímetros radar emplean el efecto Doppler para determinar la velocidad de la superficie del agua. Las unidades de radar producen una señal de radio que, al interactuar con ondas superficiales cortas producidas por situaciones como la turbulencia, la lluvia o el viento, sufre retrodispersión y regresa a la antena. La longitud de las ondas de dispersión  $\lambda_b$  viene dada por la condición de Bragg como (SENAMHI, 2018):

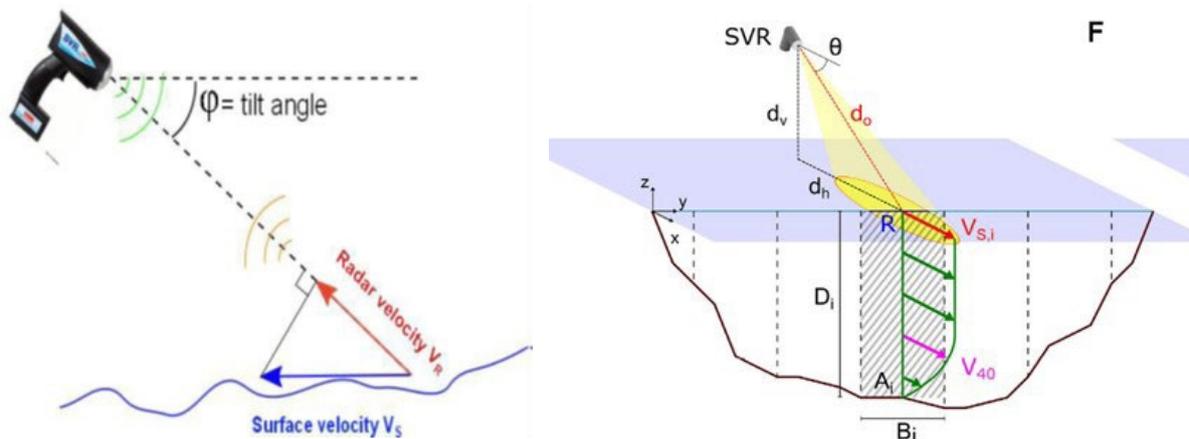
$$\lambda_b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (14)$$

Donde

- $\lambda$  : Longitud de onda de la señal incidente
- $\theta$  : Ángulo de incidencia

**Figura 27**

*Esquema del principio de funcionamiento del radar de velocidad.*



*Nota.* Es necesario medir con frecuencia el ángulo de incidencia en el campo para determinar la inclinación más fiable que permita calcular la velocidad del flujo de agua. Tomando de (SENAMHI, 2018).

### 2.2.10. Error estadístico

Para cuantificar el error entre el método UAV que emplea LSPIV y los métodos tradicionales de medición de la velocidad superficial, se recomienda usar el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) para comparar los resultados del error (Liu et al., 2021). Los errores estadísticos se pueden expresar como:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i^m - V_i^0| \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [V_i^m - V_i^0]^2} \quad (16)$$

Donde

$N$  : Número total de valores medidos

$V_i^m$  : Resultados de medición obtenidos utilizando el correntómetro

$V_i^0$  : Valores medidos obtenidos utilizando un UAV con LSPIV

Asimismo, Zhang et al. (2023), indica que para comparar los resultados obtenidos de la velocidad del río con los obtenidos por LSPIV es necesario usar la fórmula del error cuadrático medio relativo (R-RMSE) como se muestra en la ecuación (17):

$$R - RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [V_i^m - V_i^0]^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^m} \times 100 \quad (17)$$

Además, Lin et al. (2022), añade que los resultados de la prueba se evalúan comparando el error relativo medio (MAPE), que se calcula de la siguiente manera:

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|V_i^m - V_i^0|}{V_i^m}}{N} \times 100 \quad (18)$$

### 2.2.11. Modelos de distribución

La estadística los modelos de distribución permiten caracterizar la distribución de un conjunto de datos en un proceso de medición o experimentación. Seleccionar el modelo adecuado depende de la naturaleza del conjunto de datos. El análisis es importante en la evaluación de la precisión de las mediciones y realizar ajustes en los modelos predictivos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

En el campo de la estadística se presentan varias funciones teóricas de distribución de probabilidad; se aconseja el uso de las siguientes funciones:

- Distribución Normal
- Distribución Log Normal 2 parámetros
- Distribución Log Normal 3 parámetros
- Distribución Gamma 2 parámetros
- Distribución Gamma 3 parámetros
- Distribución Log Pearson tipo III
- Distribución Gumbel
- Distribución Log Gumbel

#### 2.2.11.1. Distribución Normal

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2} \quad (19)$$

Donde

$f(x)$  : función densidad normal de la variable  $x$

$X$  : variable independiente

$\mu$  : parámetro de localización, igual a la media aritmética de  $x$

$S$  : parámetro de escala, igual a la desviación estándar de  $x$

### 2.2.11.2. Distribución Log Normal 2 Parámetros

La función de distribución de probabilidad es:

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\left(\frac{-(x-\bar{X})^2}{2S^2}\right)} dx \quad (20)$$

Donde  $\bar{X}$  y  $S$  son los parámetros de la distribución. Si la variable  $x$  de la ecuación (17) se reemplaza por una función  $y = f(x)$ , tal que  $y = \log(x)$ , la función puede normalizarse, transformándose en una ley de probabilidades denominada log - normal,  $N(Y, S_y)$ . Los valores originales de la variable aleatoria  $x$ , deben ser transformados a  $y = \log x$ , de tal manera que:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \log \frac{x_i}{n}$$

Donde  $\bar{Y}$  es la media de los datos de la muestra transformada.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}}$$

Donde  $S_y$  es la desviación estándar de los datos de la muestra transformada.

Asimismo; se tiene las siguientes relaciones:

$$C_s = \frac{a}{S^3 y}$$
$$a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^3 \quad (21)$$

Donde  $C_s$  es el coeficiente de oblicuidad de los datos de la muestra transformada. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

### 2.2.11.3. Distribución Log Normal 3 parámetros

La función de densidad de x es:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sqrt{(2\pi)Sy}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0)-u_y}{Sy}\right)^2} \quad (22)$$

Para  $x > x_0$

Donde

$x_0$  : parámetro de posición

$U_y$  : parámetro de escala o media

$Sy^2$  : parámetro de forma o varianza

### 2.2.11.4. Distribución Gamma 2 parámetros

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} \quad (23)$$

Válido para:

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Donde

$\gamma$  : parámetro de forma

$\beta$  : parámetro de escala

### 2.2.11.5. Distribución Gamma 3 parámetros

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \quad (24)$$

Válido para:

$$x_0 \leq x \leq \infty$$

$$-\infty \leq x_0 \leq \infty$$

$$0 \leq \beta \leq \infty$$

$$0 \leq \gamma \leq \infty$$

Donde

$x_0$  : origen de la variable  $x$ , parámetro de posición

$\gamma$  : parámetro de forma

$\beta$  : parámetro de escala

### 2.2.11.6. Distribución Log Pearson tipo III

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x \beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \quad (25)$$

Válido para:

$$x_0 \leq x \leq \infty$$

$$-\infty \leq x_0 \leq \infty$$

$$0 \leq \beta \leq \infty$$

$$0 \leq \gamma \leq \infty$$

Donde

$x_0$  : parámetro de posición

$\gamma$  : parámetro de forma

$\beta$  : parámetro de escala

### 2.2.11.7. Distribución Gumbel

La distribución de Valores Tipo I conocida como Distribución Gumbel o Doble Exponencial tiene como función de distribución de probabilidades la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (26)$$

Utilizando el método de momentos, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma}$$

$$\beta = \mu - 0.45\sigma$$

Donde

$\alpha$  : Parámetro de concentración

$\beta$  : Parámetro de localización

Según Ven Te Chow, la distribución puede expresarse de la siguiente forma:

$$x = \underline{x} + k\sigma \quad (27)$$

Donde

$x$  : Valor con una probabilidad dada

$\underline{x}$  : Media de la serie

$k$  : Factor de frecuencia

### 2.2.12. Pruebas de bondad de ajuste

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2011) define a las pruebas de bondad de ajuste como pruebas de hipótesis usadas para evaluar si un conjunto de datos es una muestra independiente de la distribución elegida. Las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la  $\chi^2$  y la Kolmogorov – Smirnov.

#### Prueba $\chi^2$

Esta prueba fue propuesta por Karl Pearson en 1900, se aplica para verificar bondad de las distribuciones y log normales.

Para aplicar la prueba, el primer paso es dividir los datos en un número k de intervalos de clase. Luego se calcula el parámetro estadístico:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} \quad (28)$$

Donde

$\theta_i$  : es el número observado de eventos en el intervalo  $i$  y  $\varepsilon_i$  es el número esperado de eventos en el mismo intervalo

$\varepsilon_i$  se calcula como:

$$\varepsilon_i = n[F(S_i) - F(I_i)] \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Donde

$F(S_i)$  : función de distribución de probabilidad en el límite superior del intervalo  $i$

$F(I_i)$  : misma función en el límite inferior y  $n$  es el número de eventos

Una vez calculado el parámetro D para cada función de distribución considerada, se determina el valor de una variable aleatoria con distribución  $\chi^2$  para  $v = k-1-m$  grados de libertad y un nivel de significancia  $\alpha$ , donde  $m$  es el número de parámetros estimados a partir de los datos.

Para aceptar una función de distribución dada, se debe cumplir:

$$\text{III.} \quad D \leq \chi_{1-\alpha, k-1-m}^2$$

El valor de  $\chi^2_{1-\alpha, k-1-m}$  se obtiene de tablas de la función de distribución  $\chi^2$ .

Cabe recalcar que la prueba del  $\chi^2$ , desde un punto de vista matemático solo debería usarse para comprobar la normalidad de las funciones normal y Log normal. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

### Prueba Kolmogorov – Smirnov

Método que comprueba la bondad de ajuste de las distribuciones, permitiendo elegir la más representativa, es decir la que mejor se ajuste.

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada  $F_o(x_m)$  y la estimada  $F(x_m)$ :

$$D = \text{máx}/F_o(x_m) - F(x_m)$$

Con un valor crítico  $d$  que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado (Tabla 1). Si  $D < d$ , se acepta la hipótesis nula. Esta prueba tiene la ventaja sobre la prueba de  $\chi^2$  de que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_o(x_m) = \frac{1 - m}{(n + 1)} \quad (29)$$

Donde  $m$  es el número de orden de dato  $x_m$  en una lista de mayor a menor y  $n$  es el número total de datos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

**Tabla 1**

*Valores críticos para la prueba Kolmogorov – Smirnov*

<b>Tamaño de la muestra</b>	<b><math>\alpha = 0.10</math></b>	<b><math>\alpha = 0.05</math></b>	<b><math>\alpha = 0.01</math></b>
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
35	0.20	0.22	0.27
40	0.19	0.21	0.25

*Nota.* Adaptada del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

### **3.1. Definición de términos básicos**

- **Vehículos aéreos no tripulados**

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV) se conoce por varios nombres, como aeronave pilotada a distancia (RPA), sistema aéreo desatendido (UAS) o simplemente dron. En esencia, se considera que un UAV es una aeronave sin piloto humano, donde todas las funciones aerodinámicas pueden ser controladas por sensores a bordo o por un operador humano desde un puesto de control en tierra, o mediante la utilización de sistemas electrónicos y electroópticos autónomos (Jha, 2016).

Asimismo, Chang et al. (2020), menciona que los drones o vehículos aéreos no tripulados (UAV) ofrecen modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución a un costo mucho más bajo en comparación con la fotogrametría aérea tradicional a la misma resolución

- **Teledetección**

La teledetección espacial es una tecnología que facilita la obtención de imágenes de la superficie terrestre, con la ayuda de sensores instalados en el espacio en donde interviene la reflexión de la energía solar (Chuvieco y Salinero, 1990)

- **Fotogrametría**

La fotogrametría es la ciencia que, a partir de fotografías del terreno, podemos obtener un plano topográfico el cual representa la planta y la elevación de este. Con el avance tecnológico las fotografías pueden tomarse desde el aire con la ayuda de drones (Santamaría y Sanz, 2011).

- **Monitoreo hidrológico**

El monitoreo hidrológico permite llevar un registro de una variable a lo largo del tiempo, como la precipitación, el caudal, entre otros. Elementos que forman parte del ciclo del agua (Estabridis, 2022).

## CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2. Ubicación de la zona de estudio

#### 3.2.1. Ubicación geográfica

Se sitúa la investigación en la cuenca del río Chonta, abarcando un tramo de 3 km, con coordenadas del punto de inicio 779716.25 m E y 9210161.28 m N (Captación Remonta II) y punto final del tramo 779896.145 m E y 9207286.76 m N (Puente Chonta). Además, se seleccionaron estratégicamente cuatro puntos de medición en el tramo de estudio, considerando que las diversas estructuras presentes en esta sección influyen en la variación de la velocidad del flujo. Las ubicaciones específicas de estos puntos se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

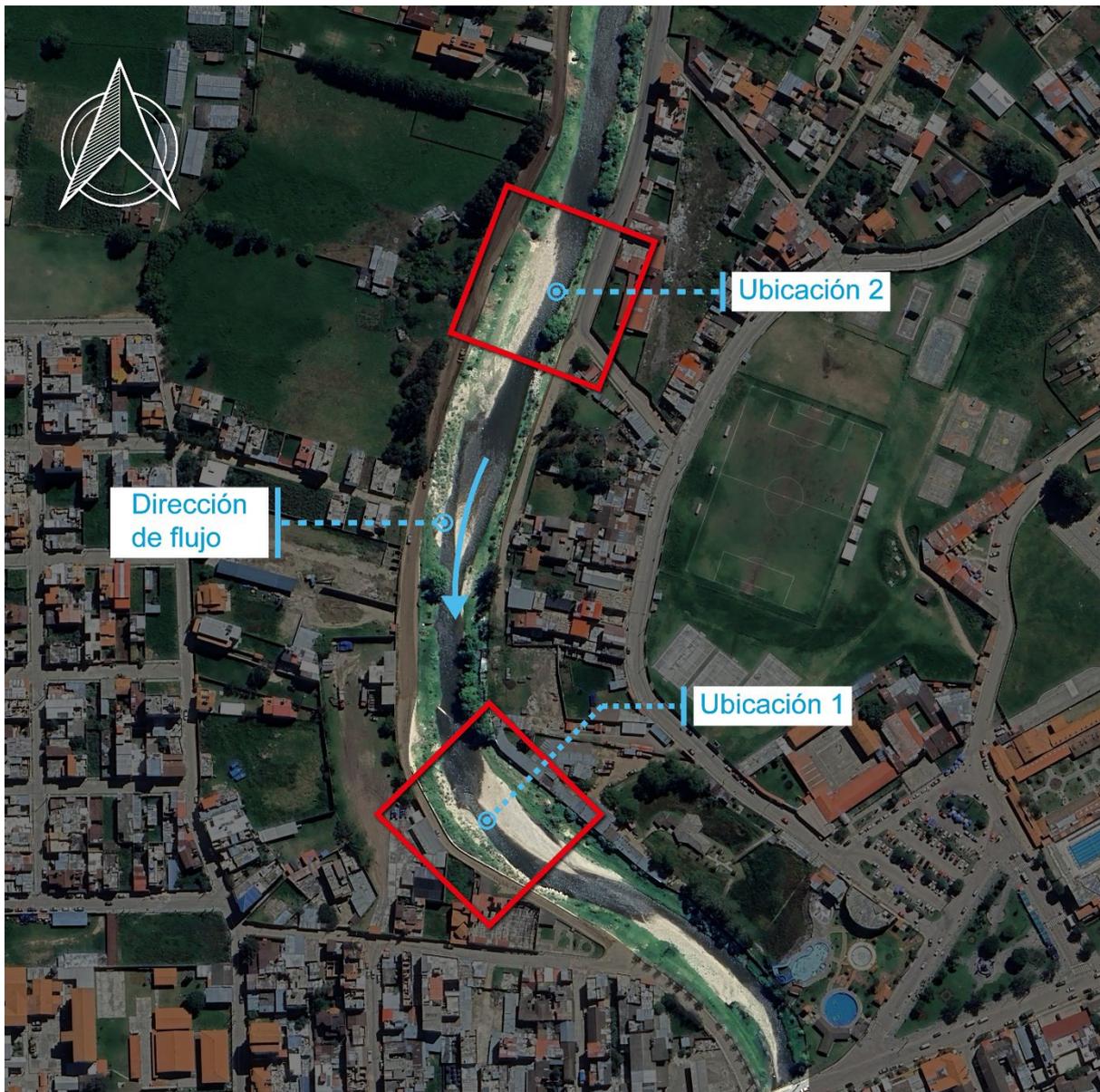
*Coordenadas de los puntos de medición mediante el método LSPIV en un tramo de 3 km del río Chonta.*

<b>Punto</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Norte (m)</b>	<b>Elevación (m.s.n.m.)</b>
E1	779731.000	9207437.000	2671.5107
E2	779767.000	9207722.000	2677.6326
E3	779657.000	9209820.000	2701.1651
E4	779631.000	9209988.000	2708.6503

*Nota.* La tabla muestra la ubicación de cuatro puntos de muestreo a lo largo de un tramo de 3 km en el río Chonta. Las mediciones se realizaron utilizando la técnica sofisticada de LSPIV, mientras que las mediciones con correntómetro sirvieron como método de calibración.

**Figura 28**

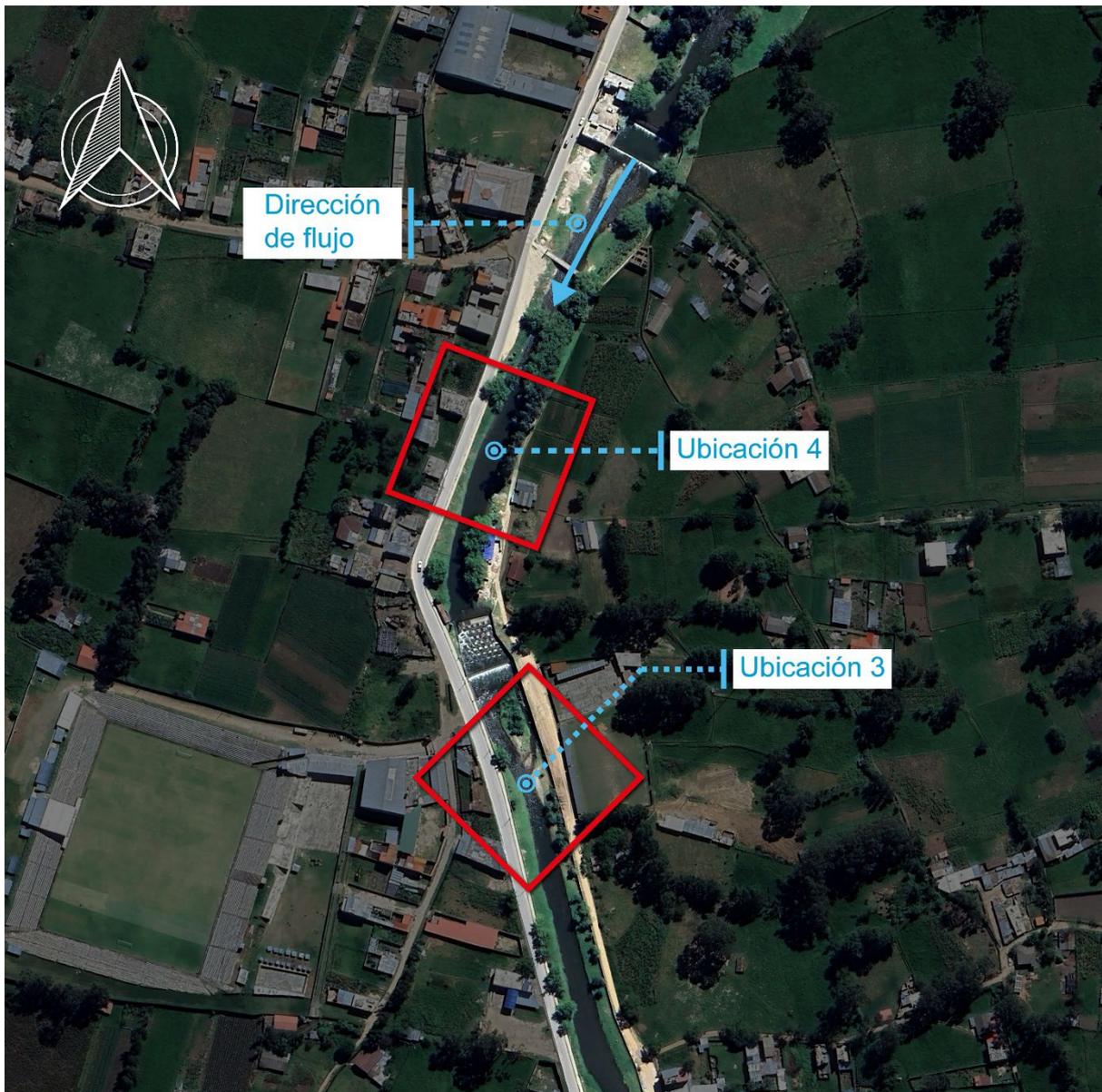
*Ubicación de los puntos de medición, 1 y 2 en el tramo seleccionado del río Chonta.*



*Nota.* La ubicación de los puntos 1 y 2 (E1 y E2) se seleccionó estratégicamente: el punto E1 se encuentra después de la curva del río Chonta, mientras que el punto E2 está antes de la curva. Las coordenadas de ubicación de ambos puntos se detallan en la Tabla 2. Elaboración propia.

**Figura 29**

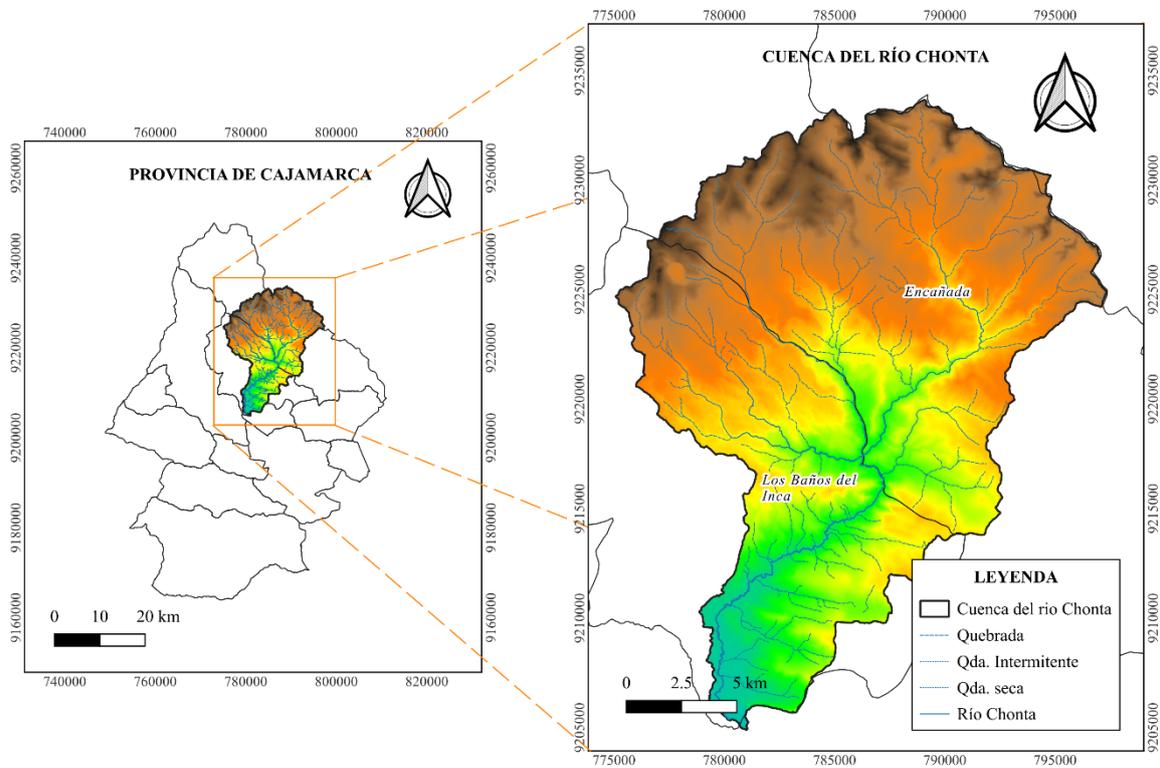
*Ubicación de los puntos de medición, 3 y 4 en el tramo seleccionado del río Chonta.*



*Nota.* La ubicación de los puntos 3 y 4 (E3 y E4) se seleccionó estratégicamente: el punto E3 se encuentra después de la bocatoma del canal Huacariz, mientras que el punto E4 está antes de la bocatoma. Las coordenadas de ubicación de ambos puntos se detallan en la Tabla 2. Elaboración propia.

**Figura 30**

*Mapa de Localización de la Cuenca del Río Chonta, con énfasis en la trayectoria del río Chonta como componente central del estudio.*



*Nota.* El tramo de análisis de 3 kilómetros del río Chonta se sitúa dentro de la cuenca que comparte su denominación. Este sector constituye la población de interés para la investigación, la cual abarca el río Chonta y sus afluentes. La muestra comprende cuatro puntos de medición distribuidos a lo largo del tramo seleccionado. Elaboración propia.

### 3.2.2. Ubicación política

El río Chonta se encuentra en Cajamarca al norte del Perú, extendiéndose entre los distritos de La Encañada, Los Baños del Inca y Cajamarca, y forma parte de la Vertiente del Atlántico. Limita al norte con la cuenca del río Llaucano, al sureste la subcuenca del río Namora (Encañada) y al suroeste con la subcuenca del río Grande afluente del río Mashcón.

El origen de este recurso se encuentra en los cerros Carachugo y Chaquicocha, siendo sus principales afluentes los ríos Azufre por la margen derecha y Paccha por la margen izquierda. La cuenca del río Chonta tiene una superficie de 34 614 hectáreas en promedio y un caudal medio estimado de aproximadamente 2500 l/s.

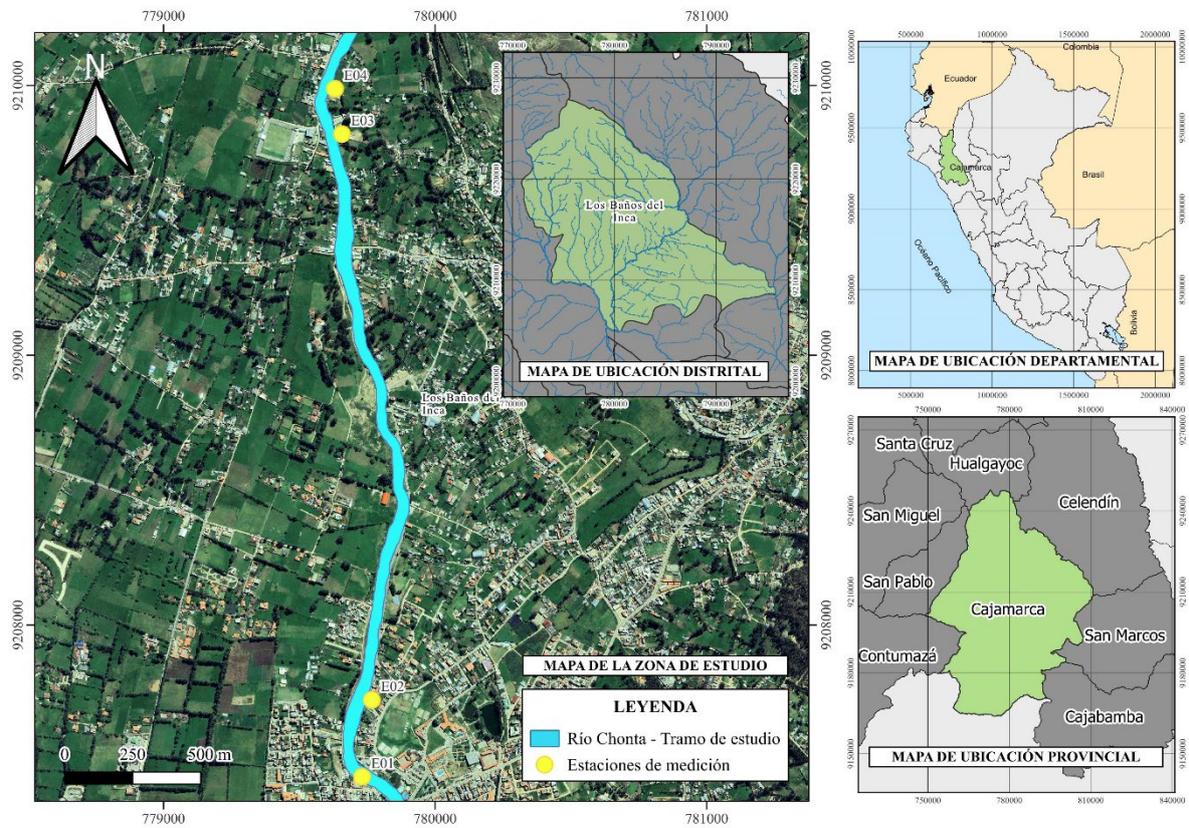
La corriente principal del río Chonta tiene 41.46 km de largo y posee un área de desagüe de alrededor de 346 km<sup>2</sup>. Es uno de los principales ríos de la provincia de Cajamarca. Consorcio Salzgitter-Sisa (2010), en su estudio de factibilidad de la presa Chonta menciona que la precipitación promedio total anual en la cuenca del río Chonta es de 644.7 mm, la temperatura máxima y mínima media mensual oscila entre 20.9 °C - 21.9 °C y 4.6 °C - 9.3 °C respectivamente. La cantidad mensual de evaporación es de 3.3 mm. La temporada de lluvias se da de noviembre a abril, mientras que la temporada seca de mayo a octubre. El río Chonta es de montaña, con la parte más alta al noreste y más bajo en el suroeste, por lo que la población se concentra a lo largo del tramo inferior del río.

En la presente investigación, el río Chonta fluye por los alrededores de la ciudad urbana y rural del distrito de Los Baños del Inca, donde se seleccionó 4 puntos en un tramo de 3 kilómetros para realizar tres campañas de medición. El ancho del río del sitio de estudio es de aproximadamente 20 m. Asimismo, se utilizaron vehículos aéreos no tripulados para tomar imágenes de la superficie del río, para el cálculo posterior de la velocidad de la superficie mediante el algoritmo LSPIV y para contrastar los resultados de esta metodología se usó como medida base los datos obtenidos mediante correntómetro.

En esta investigación, se realizaron tres campañas de campo de 14 al 17 de octubre, del 11 al 14 de noviembre y del 16 al 19 de diciembre de 2023 para medir la velocidad superficial del río.

**Figura 31**

*Ubicación política de la zona de estudio.*



*Nota.* La zona de estudio se ubica en Cajamarca, provincia de Cajamarca y distrito de Los Baños del Inca. Elaboración propia.

### 3.3. Materiales y equipos

La medición de la velocidad superficial a través de LSPIV implica el empleo de equipos avanzados y adecuados, cuya finalidad es obtener resultados precisos para realizar un análisis adecuado y compararlos con otros métodos de medición, con el fin de calibrar el procedimiento de manera efectiva.

#### 3.3.1. Materiales

Los materiales usados en la presente investigación son los siguientes:

- Viruta de madera (trazadores)
- Cordel seccionado
- Cinta métrica
- Marcas de posición aérea
- Materiales de escritorio
- Software PIVlab
- Software RIVeR

#### 3.3.2. Equipos

Para la presente investigación se hicieron uso de los siguientes equipos:

##### a. Recursos para la toma de datos de campo

- Drone DJI Phantom 4 RTK SE
- Estación móvil (Antena RTK)
- Correntómetro PASCO PS-2130
- Adaptador analógico PASCO

##### b. Recursos para la fase de gabinete

- Laptop MSI Pulse GL66
- Impresora multifuncional a color EPSON L4160

### Tabla 3

*Especificaciones del Dji Phantom 4 Pro RTK*

<b>Especificaciones del DJI Phantom 4 Pro RTK</b>	
Peso	1388 g
Dimensiones (Longitud x Grosor x Altura)	350 x 350 x 200 mm
Duración máxima de vuelo estacionario	30 minutos
Distancia máxima de vuelo	7 km (FCC)

<b>Alcance de precisión en vuelo estacionario</b>	
Vertical (con posicionamiento visual)	± 0.1 m
Vertical (con posicionamiento GPS)	± 0.5 m
Horizontal (con posicionamiento visual)	± 0.3 m
Horizontal (con posicionamiento GPS)	± 1.5 m
<b>Resolución de la cámara</b>	
Resolución máxima de la foto	20 MP (5472 x 3648 píxeles)
<b>Resolución de video y frecuencia de imagen</b>	
4K Ultra HD	4096 x 2160 (24/25/30/50/60 fps)
2.7K	2720 x 1530 (24/25/30/48/50/60 fps)
FHD	1920 x 1080 (24/25/30/48/50/60/120 fps)

*Nota.* Especificaciones adaptadas de Support for Phantom 4 Pro. (s/f). Disponible en: <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>

**Tabla 4**

*Especificaciones del Dji Mavic Air 2*

<b>Especificaciones del DJI Air 2S</b>	
Peso	595 g
Dimensiones (Longitud x Grosor x Altura)	183 x 253 x 77 mm
Duración máxima de vuelo estacionario	30 minutos
Distancia máxima de vuelo	18.5 km
<b>Alcance de precisión en vuelo estacionario</b>	
Vertical (con posicionamiento visual)	± 0.1 m
Vertical (con posicionamiento GPS)	± 0.5 m
Horizontal (con posicionamiento visual)	± 0.1 m
Horizontal (con posicionamiento GPS)	± 1.5 m
<b>Resolución de la cámara</b>	
Resolución máxima de la foto	20 MP (5472 x 3648 píxeles)
<b>Resolución de video y frecuencia de imagen</b>	
5.4K	5472 x 3078 (24/25/30 fps)
4K Ultra HD	3840 x 2160 (24/25/30/48/50/60 fps)
2.7K	2688 x 1512 (24/25/30/48/50/60 fps)
FHD	1920 x 1080 (24/25/30/48/50/60/120 fps)

*Nota.* Especificaciones adaptadas de Support for DJI air 2S. (s/f). Disponible en: <https://www.dji.com/global/support/product/air-2s>

Se seleccionó el dron Phantom 4 Pro RTK por su diseño robusto y estabilidad en condiciones adversas. Su cámara profesional 4K/60 fps permite capturar flujos rápidos con detalle, y su precisión en vuelos estacionarios lo hace ideal para mediciones LSPIV.

### **3.4. Metodología**

La investigación es de tipo correlacional, ya que busca medir la velocidad superficial del río Chonta, implicando el control de variables, como la aplicación de la técnica LSPIV y la selección de puntos de medición en el río. Se recopilarán datos específicos de velocidad superficial y se analizarán estadísticamente para obtener resultados significativos con el objetivo de proporcionar información detallada sobre las características hidrológicas de ese río en el distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca, en el año 2023.

El nivel de la investigación es de tipo aplicado, ya que la falta de estaciones hidrométricas para el monitoreo hidrológico, específicamente en lo que respecta a la velocidad del río, constituye una limitación. Por ello, el estudio lleva a la medición de la velocidad superficial del río Chonta. Este proceso se lleva a cabo mediante la implementación de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), respaldada por la utilización de la técnica del correntómetro. Esta última se emplea con el propósito de obtener datos de calibración esenciales para el método mencionado.

El diseño de la investigación es transversal, donde se recopilan datos en un solo punto en el tiempo. En este caso, se realizaría una medición única de la velocidad superficial del río Chonta utilizando la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV). Se seleccionarían varios puntos de medición a lo largo del río para obtener una visión general de la velocidad superficial en diferentes áreas. Además, podría considerarse un enfoque de estudio transversal repetido, donde las mediciones se realizan en diferentes momentos a lo largo de un período de tiempo relativamente corto para tener en cuenta posibles variaciones en la velocidad del río.

El método de investigación es cuantitativo, donde se mide y recopila datos numéricos sobre la velocidad superficial del río Chonta mediante la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) y correntómetro. Se establecieron cuatro puntos de medición a lo largo del río y se capturaron imágenes de partículas en tres campañas de medición. Estas imágenes se procesaron utilizando los softwares PIVlab y RIVeR basados en el entorno de MATLAB y posteriormente se analizaron para obtener medidas precisas de la velocidad del agua en cada punto.

A partir de la información recopilada, se ha llegado a la conclusión de que el flujo de trabajo de LSPIV se compone de cuatro etapas fundamentales: (1) adquisición de datos y preparación

inicial; (2) preprocesamiento de imágenes; (3) evaluación de imágenes; y (4) postprocesamiento.

La zona de estudio abarca un tramo de 3 kilómetros del río Chonta. Según su clasificación, este río es recto en términos de geometría, joven debido a su naturaleza de río de montaña, y presenta un arrastre de fondo y en suspensión en función de su caudal y carga de sedimentos. El tramo seleccionado incluye diversas estructuras de captación que generan variaciones en la velocidad aguas abajo, lo que lo hace especialmente interesante para el análisis. Además, en este mismo tramo se encuentra un viaducto que reduce la sección del río en un punto específico.

- **Población de Estudio**

La población de estudio está representada por el río Chonta y sus afluentes en la región Cajamarca.

- **Muestra**

La muestra está representada por la zona de estudio ubicado en el río Chonta, dentro de un tramo de 3 kilómetros aproximadamente. El tramo presenta 04 puntos de análisis seleccionados para realizar las mediciones de la velocidad superficial del río Chonta utilizando la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV).

### **3.5. Procedimiento**

El procedimiento considerado en la presente investigación consta de las siguientes etapas.

- a. adquisición de datos y trabajo preparatorio,
- b. preprocesamiento de imágenes,
- c. evaluación de imágenes, y
- d. postprocesamiento.

Las consideraciones importantes para cada etapa se resumen en los ítems siguientes:

#### **3.5.1. Primera etapa: Adquisición de datos y trabajo preparatorio**

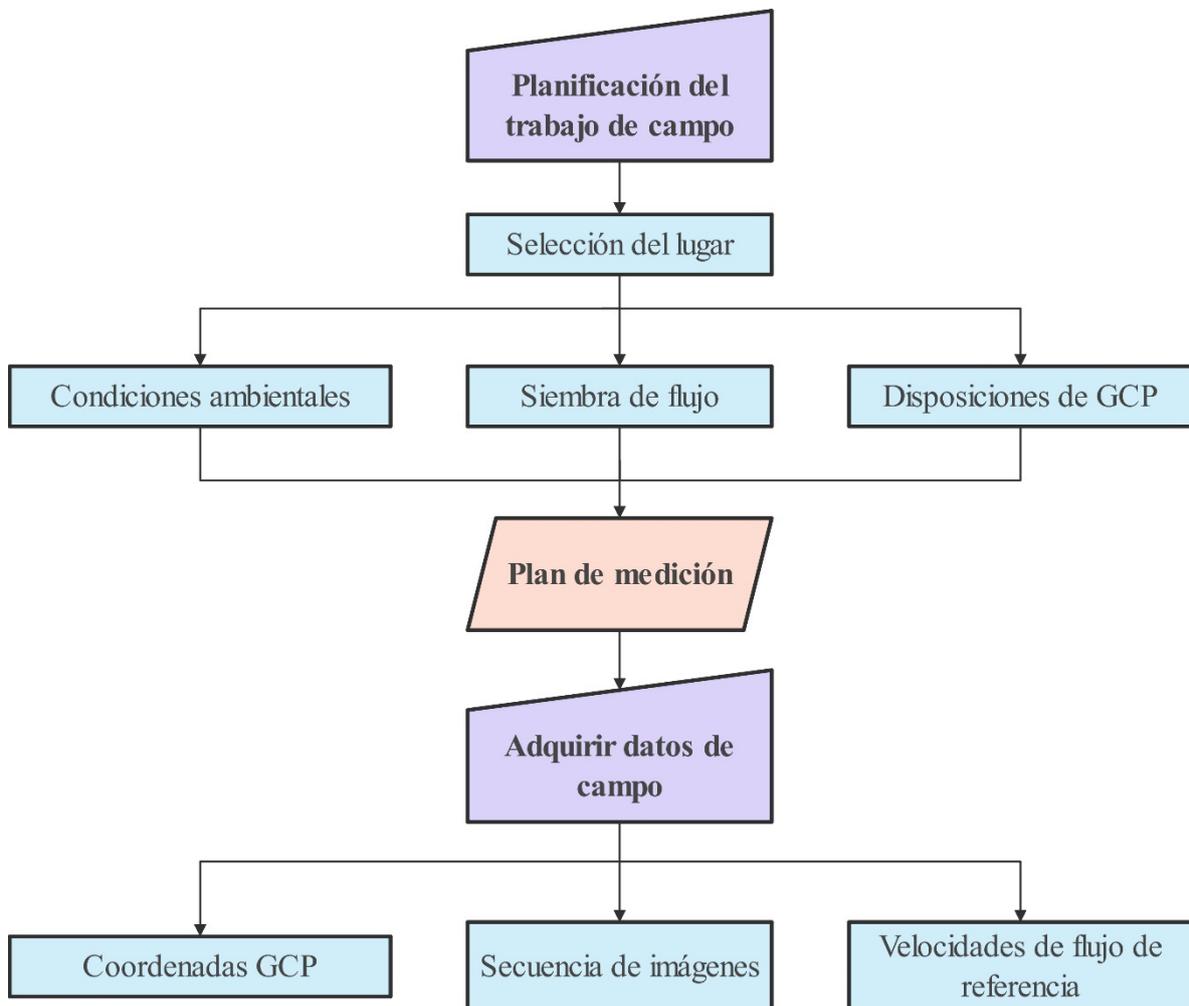
La primera etapa consiste en realizar el reconocimiento y selección del lugar de muestreo, posterior a ello planificar las campañas de adquisición de datos. Se debe tener en cuenta la siembra de trazadores sobre la superficie del agua, ya que es esencial para obtener resultados apropiados de la LSPIV. Los trazadores deben ser lo suficientemente grandes, estar distribuidos

homogéneamente y contrastar con el color de la superficie, además, los trazadores pueden ser naturales como artificiales, esto dependerá de las características que presenta el flujo.

Otros factores para tener en cuenta en la velocimetría de imágenes son la colocación de puntos de control terrestre (GCP) así como la configuración de la cámara. También se debe tener en cuenta factores climáticos por ejemplo la lluvia, el sol, niebla, etc. Estos pueden generar ruido y distorsión en las imágenes. Además, es necesario tener en cuenta que los drones pueden ser utilizados en condiciones específicas, aunque hoy en día podemos encontrar drones pueden ser usados en condiciones extremas. Por ello es necesario contar con una planificación para realizar campañas de medición y evitar condiciones no aptas de medición.

**Figura 32**

*Flujo de trabajo LSPIV para la adquisición de datos y trabajo preparatorio, etapa 1.*



*Nota.* El siguiente flujo de trabajo, se enfoca en la planificación del trabajo de campo y la adquisición de datos. Asimismo, las velocidades de flujo de referencia están relacionados con la evaluación de la precisión, parte de la cuarta etapa.

Como último paso es ejecutar el plan de medición. Esto implica adquirir una secuencia de imágenes de la superficie del agua mediante un dron. El dron se posicionará perpendicular al flujo y a diferentes alturas, específicamente a 20, 30 y 40 metros de altura desde el nivel de referencia. En esta investigación también se obtuvo velocidades de referencia haciendo uso del correntómetro, las cuales fueron obtenidas paralelas al método de la LSPIV, ya que son necesarias para evaluar cuantitativamente la precisión del rendimiento del LSPIV en una fase posterior del flujo de trabajo del LSPIV.

**Tabla 5***Data de campo en las diferentes campañas de medición.*

<b>N° de Campaña</b>	<b>Sección</b>	<b>Altitud de vuelo (m)</b>	<b>Video</b>	<b>Formato de video</b>	<b>Resolución de imagen (píxeles)</b>	<b>Fotogramas por segundo (FPS)</b>	<b>Fecha de vuelo</b>	
01	01	20	DJI_0067	MOV	3840x2160	29.97	14-10-23	
		30	DJI_0068	MOV	3840x2160	29.97	14-10-23	
		40	DJI_0069	MOV	3840x2160	29.97	14-10-23	
	02	02	20	DJI_0070	MOV	3840x2160	29.97	15-10-23
			30	DJI_0071	MOV	3840x2160	29.97	15-10-23
			40	DJI_0072	MOV	3840x2160	29.97	15-10-23
	03	03	20	DJI_0073	MOV	3840x2160	29.97	16-10-23
			30	DJI_0074	MOV	3840x2160	29.97	16-10-23
			40	DJI_0075	MOV	3840x2160	29.97	16-10-23
	04	04	40	DJI_0077	MOV	3840x2160	29.97	17-10-23
	02	01	20	DJI_0079	MOV	3840x2160	29.97	11-11-23
			30	DJI_0080	MOV	3840x2160	29.97	11-11-23
40			DJI_0081	MOV	3840x2160	29.97	11-11-23	
02		02	20	DJI_0086	MOV	3840x2160	29.97	12-11-23
			30	DJI_0087	MOV	3840x2160	29.97	12-11-23
			40	DJI_0088	MOV	3840x2160	29.97	12-11-23
03		03	20	DJI_0091	MOV	3840x2160	29.97	13-11-23
			30	DJI_0092	MOV	3840x2160	29.97	13-11-23
			40	DJI_0093	MOV	3840x2160	29.97	13-11-23
04		04	20	DJI_0098	MOV	3840x2160	29.97	14-11-23
			30	DJI_0099	MOV	3840x2160	29.97	14-11-23
			40	DJI_0101	MOV	3840x2160	29.97	14-11-23
03	01	20	DJI_0105	MOV	3840x2160	29.97	16-12-23	
		30	DJI_0106	MOV	3840x2160	29.97	16-12-23	
		40	DJI_0107	MOV	3840x2160	29.97	16-12-23	
	02	02	20	DJI_0111	MOV	3840x2160	29.97	17-12-23

	30	DJI_0112	MOV	3840x2160	29.97	17-12-23
	40	DJI_0113	MOV	3840x2160	29.97	17-12-23
03	20	DJI_0117	MOV	3840x2160	29.97	18-12-23
	30	DJI_0118	MOV	3840x2160	29.97	18-12-23
	40	DJI_0119	MOV	3840x2160	29.97	18-12-23
04	20	DJI_0123	MOV	3840x2160	29.97	19-12-23
	30	DJI_0124	MOV	3840x2160	29.97	19-12-23
	40	DJI_0125	MOV	3840x2160	29.97	19-12-23

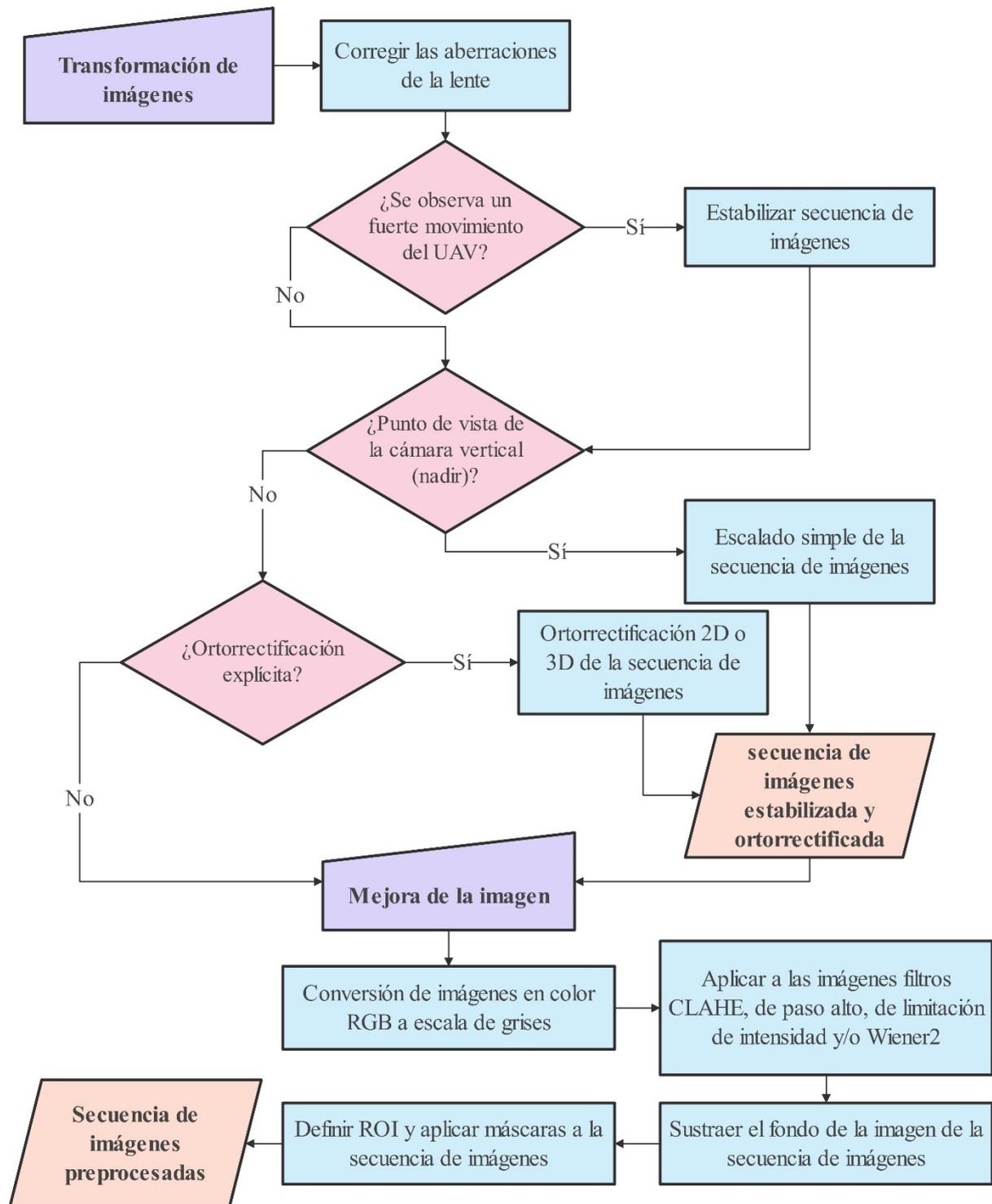
### 3.5.2. Segunda etapa: Preprocesamiento de imágenes

La segunda etapa LSPIV, corresponde a la importación de imágenes en bruto y los datos de campo a los softwares de RIVeR y PIVlab desarrollados en el entorno MATLAB. El algoritmo PIV ayuda a determinar el campo de velocidad de la secuencia de imágenes. En la Figura 33 se muestra diversos pasos para el procesamiento de imágenes.

El objetivo principal es la corregir la distorsión de las imágenes producidas por aberraciones en la lente de la cámara. Para lograr esa corrección se recurre a métodos de transformación como la estabilización y la ortorrectificación de la imagen. El proceso de ortorrectificación requiere coordenadas reales situadas en el terreno, obtenidas en campo ya sea con wincha o métodos topográficos. Además, Figura 33 sugiere que la ortorrectificación puede darse de forma explícita (rectificación de imágenes) o implícita (campos vectoriales). Posterior al proceso anterior se procede a mejorar la imagen con la aplicación de filtros con el fin de optimizar la detectabilidad y trazabilidad de los trazadores o patrones de flujo.

**Figura 33**

*Flujo de trabajo LSPIV para el preprocesamiento de imágenes, etapa 2.*



*Nota.* El siguiente flujo de trabajo, se enfoca en la transformación de imágenes obtenidas en campo y a su vez en la mejora de la imagen con la aplicación de filtros entre otros.

Como último paso se procede a delimitar las regiones de interés (ROI) y se dibujan mascarar en las zonas estáticas, la cual, serán omitidas en el análisis por ejemplo en la presente investigación se obviarán los márgenes del río. La extracción, estabilización y ortorrectificación de imágenes se realiza con el software RIVeR y la mejora de la imagen se desarrolla en la caja de herramientas PIVlab.

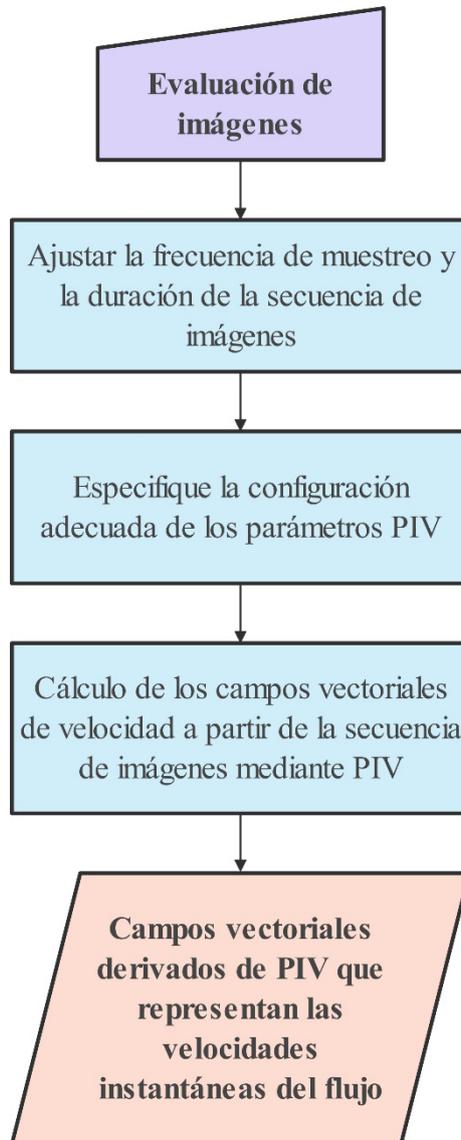
### **3.5.3. Tercera etapa: Evaluación de imágenes**

En esta etapa de evaluación de imágenes, el algoritmo PIV se aplica a la secuencia de imágenes preprocesadas según lo descrito en la etapa anterior. El algoritmo intenta determinar el desplazamiento de los patrones haciendo uso de la función de correlación cruzada. El algoritmo está basado en un enfoque euleriano donde se centra en determinar el movimiento del flujo que pasa por un volumen de control.

Cabe resaltar que para determinar el campo de velocidad es necesario definir la duración de la secuencia de imágenes y la frecuencia de muestreo la cual está este último está relacionada a la velocidad de fotogramas. Los resultados obtenidos son campos vectoriales, estos representan las velocidades instantáneas del flujo superficial en la región de interés (ROI) seleccionada

**Figura 34**

*Flujo de trabajo LSPIV para evaluación de imágenes, etapa 3.*



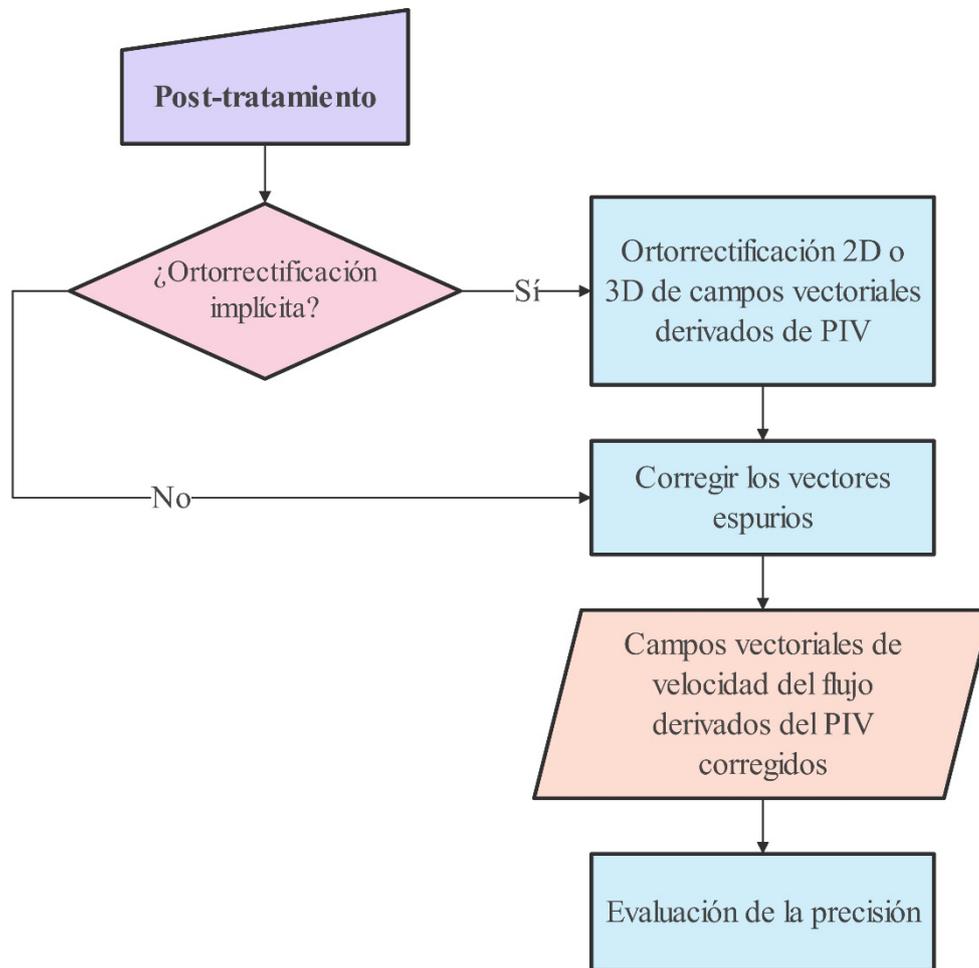
*Nota.* Este diagrama de flujo se enfoca en la evaluación de imágenes, teniendo como resultado campos vectoriales que representan las velocidades instantáneas del flujo.

#### **3.5.4. Cuarta etapa: Postprocesamiento**

Finalmente, en esta etapa se procede a corregir los vectores erróneos en el campo vectorial de velocidades para su posterior análisis. Los métodos estadísticos ayudan a analizar y detectar valores atípicos en los datos LSPIV. Los vectores erróneos se eliminan y se reemplazan mediante procesos de interpolación.

**Figura 35**

*Flujo de trabajo LSPIV para el postprocesamiento, etapa 4.*



*Nota.* El esquema está centrado en el postprocesamiento de resultados y finalmente la evaluación de la precisión de los resultados con velocidades de referencia el cual se mencionó en la etapa 1.

En esta investigación se optará por aplicar la ortorrectificación implícita, donde el campo vectorial obtenidos en PIVlab se exporta a al software RIVeR. Como resultado es un campo vectorial corregido que representa las velocidades del flujo superficial de la región de interés promediadas en el tiempo.

Por último, es necesario verificar los campos de velocidad derivados de la LSPIV mediante comparaciones con mediciones referenciales obtenidas durante la campaña de recolección de datos, donde se observará si son capaces de describir cuantitativa y cualitativamente los patrones del flujo observados.

### **3.6. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultado**

El tratamiento de la información se inicia después de la toma de datos en campo, en donde se realiza el agrupamiento de la información según las campañas de medición, que incluye el video de la medición y los puntos de ortorectificación junto a la medición base de la velocidad del río con el correntómetro.

Los videos que procesar siguen la siguiente secuencia *RiVeR* -> *PIVlab* -> *RiVeR*.

Una vez obtenidos los resultados comparamos los resultados LSPIV con la medición base del correntómetro y realizamos un análisis estadístico.

### **3.7. Procesamiento de imágenes de las secciones del Río Chonta con RIVeR y PIVlab**

#### **▪ Extracción de imágenes**

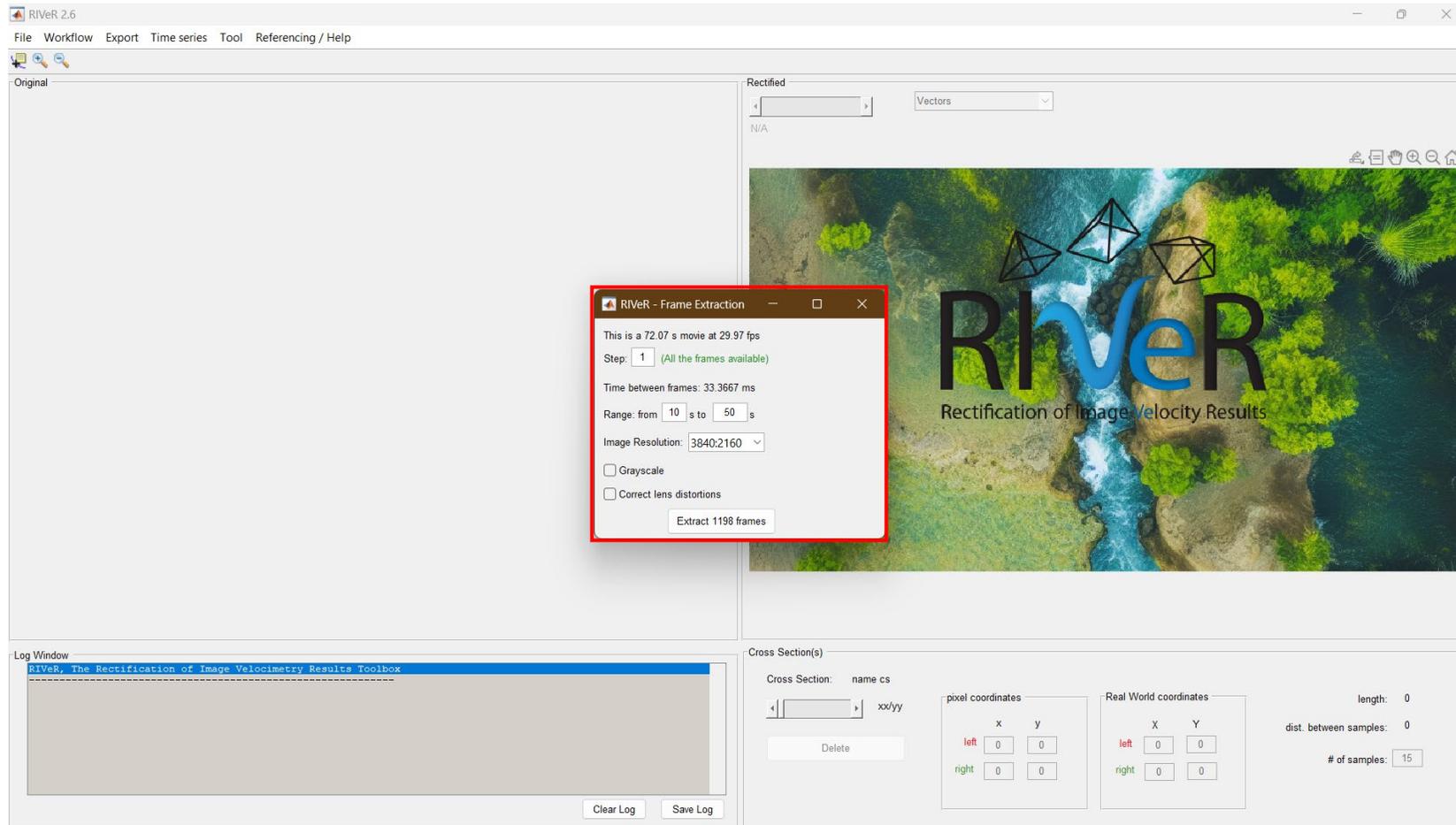
El primer paso consiste en la extracción de imágenes de un video de la superficie de agua y obtener un grupo de imágenes y analizar con la técnica PIV. Desde el menú del RIVeR en *File>Extract Image from movie*, seleccionar el archivo de video a procesar (ver Figura 36). Aparece una nueva ventana mostrando la información básica del video como la duración total y la velocidad de fotogramas (fps) a la que ha sido grabado.

#### **▪ Tratamiento de imágenes de partículas con PIVlab**

RIVeR incluye PIVlab y se puede abrir desde el menú de RIVeR en *File>PIVlab>PIVlab\_GUI*. La interfaz de PIVlab se abrirá en una nueva ventana (ver Figura 37).

**Figura 36**

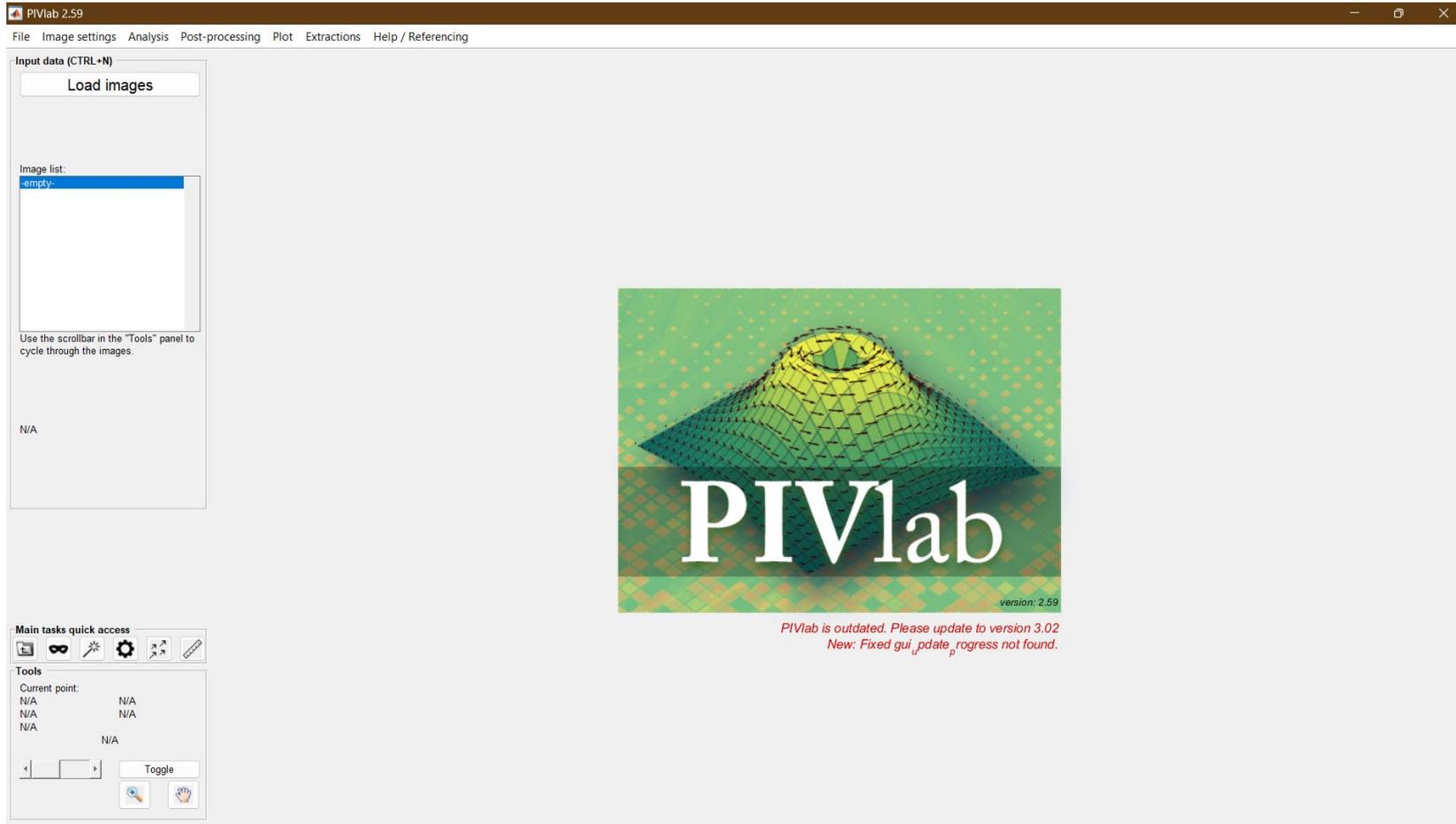
*Proceso de extracción de imágenes con la interfaz de RIVeR.*



*Nota.* Se usó un rango de extracción de imágenes de 40 segundos, con una resolución de imagen de 3840:2160 píxeles a 29.97 fotogramas por segundo (fps).

**Figura 37**

*Interfaz gráfica de PIVlab.*



- **Carga de imágenes**

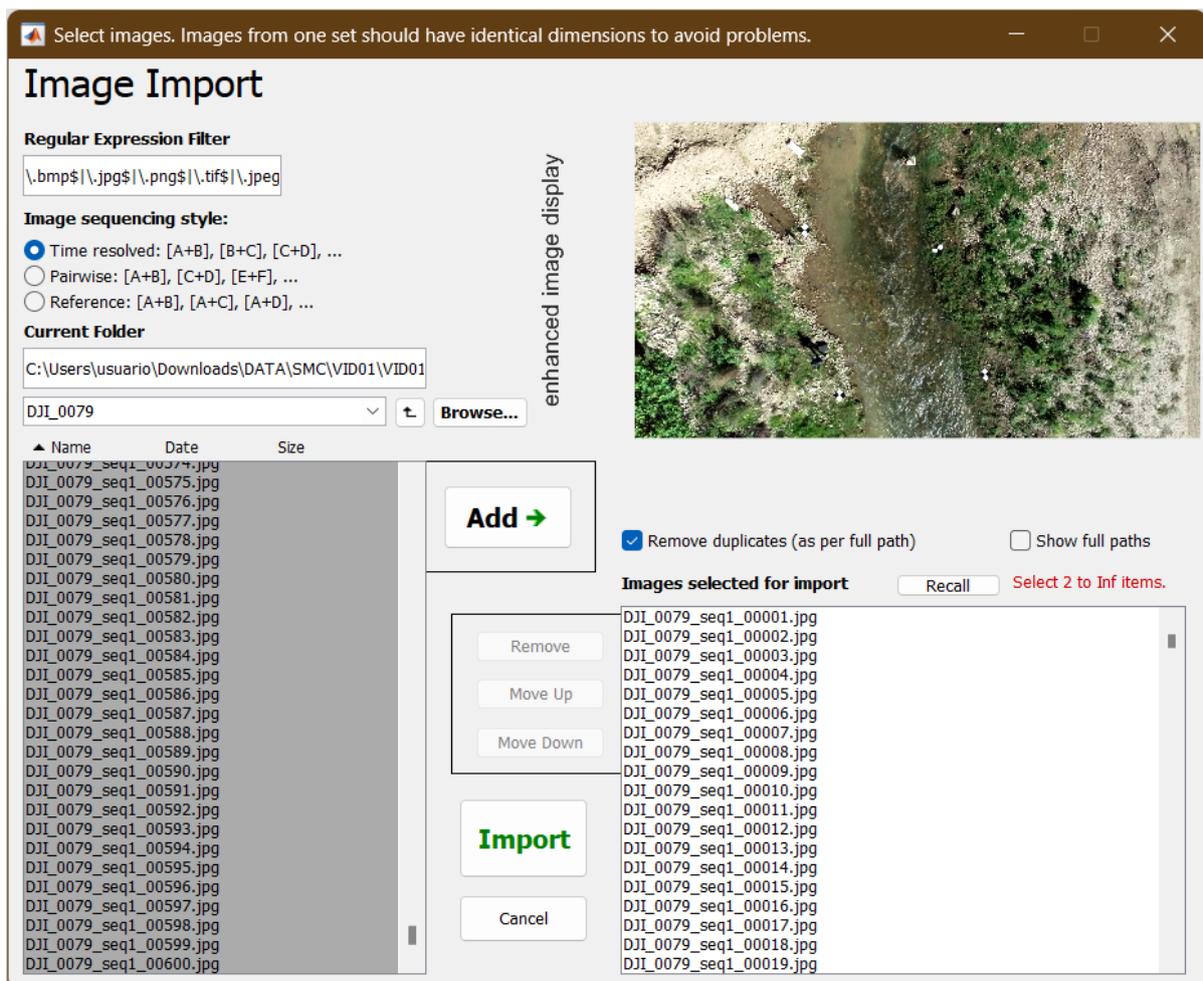
Para el proceso de cargar imágenes consiste en hacer clic en *Load images*. Aparecerá una nueva ventana donde podrá seleccionar el conjunto de imágenes en Directorio Actual (ver Figura 38). Una vez seleccionada la ruta podrá ver el conjunto de imágenes en el cuadro de lista inferior.

- **Establecer una región de interés y una máscara**

En el proceso de modelamiento es necesario seleccionar una región de interés (ROI) para reducir el coste computacional del procesado de la imagen. Todo dentro del ROI será procesado. Sin embargo, en muchos casos dentro del ROI puede excluir áreas de la imagen del análisis dibujando máscaras (ver Figura 39 y Figura 40).

**Figura 38**

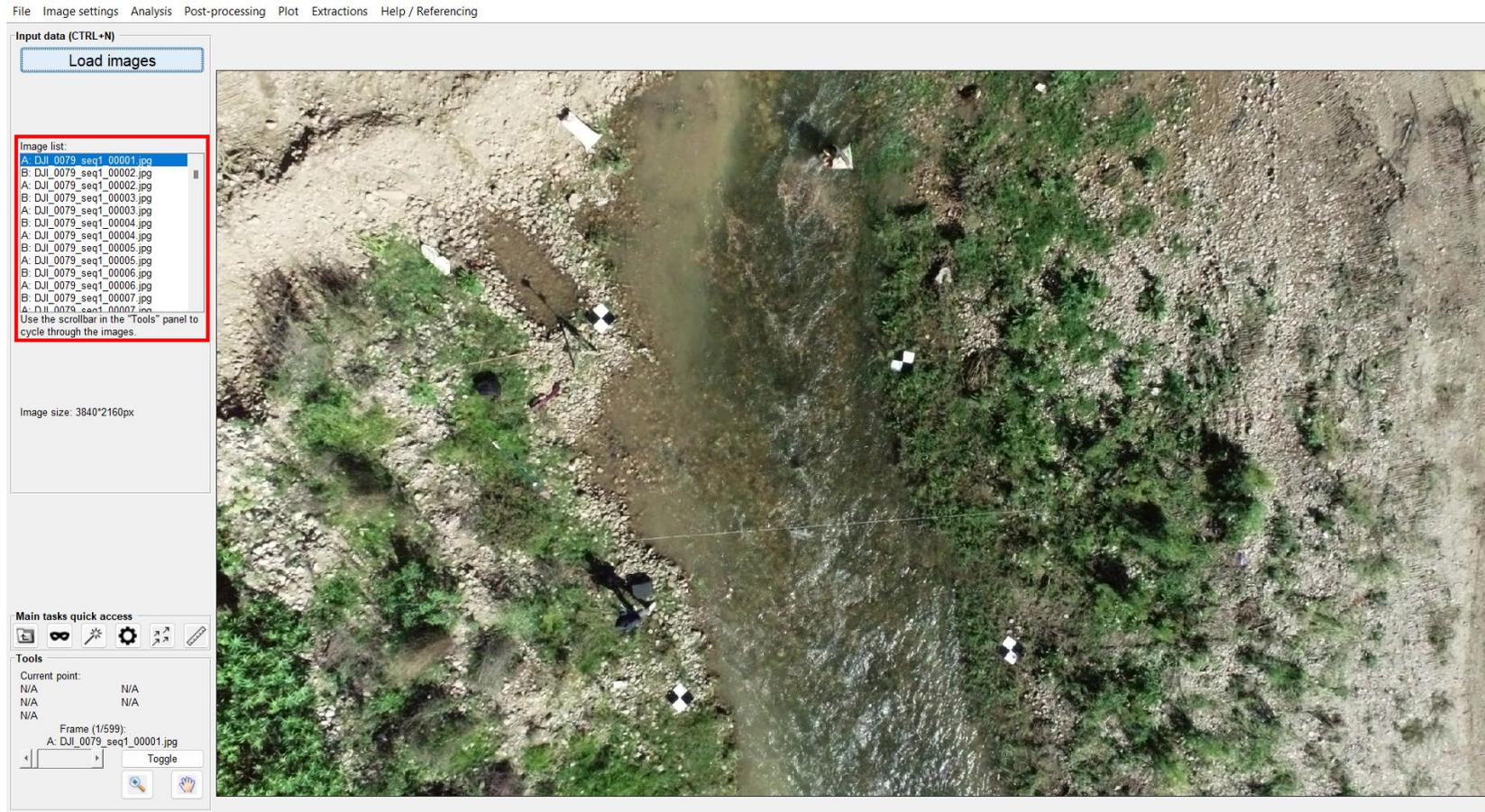
*Ventana gráfica de PIVlab para la carga de imágenes a procesar.*



*Nota.* Debido a que la secuencia de imágenes es constante se selecciona *Sequencing style*  $[A+B]$ ,  $[B+C]$ ,  $[C+D]$ , .... y finalmente se agrega haciendo clic en *Add->* e *Import*.

**Figura 39**

*Interfaz gráfica de PIVlab con imágenes cargadas para su procesamiento.*



*Nota.* En la parte izquierda en la venta *Image list*: se puede observar el conjunto de imágenes a ser procesadas, asimismo para alternar una Imagen A y una Imagen B se puede realizar seleccionando el botón *Toggle*.

**Figura 40**

*Ventana de selección de una región de interés y una máscara para el análisis PIV.*



*Nota.* Proceso para ingresar a la ventana gráfica es el siguiente: *Image settings*>*Exclusions (ROI, mask)*, luego clic en *Select ROI* y dibuje un rectángulo, luego clic en *Draw mask(s) for current frame*. Finalmente, aplicar la máscara a todos los fotogramas haciendo clic en *Apply current mask(s) to frames... 1:end*.

- **Preprocesamiento de imágenes**

El contraste de la imagen para el análisis PIV se puede mejorar activando el filtro CLAHE en *Image settings>Image pre-processing*. Ya que es recomendable para realizar el análisis de la velocidad de la superficie del agua (ver Figura 41).

- **Configuración PIV**

Ingresamos a *Analysis>PIV settings* para configurar la correlación cruzada. Seleccionamos el algoritmo FFT window deformation (correlación por transformada rápida de Fourier con múltiples pasadas y deformación de ventanas) (ver Figura 42). Este último algoritmo está activado por defecto, y en la mayoría de las situaciones, ofrece los resultados más precisos. Cuanto mayor sean las áreas de interrogación mejor será la relación señal-ruido y más sólida será la correlación cruzada. Pero las áreas de interrogación grandes solo proporcionan una resolución vectorial muy baja (“vectores por fotograma”). Por eso, en las siguientes pasadas, hay que reducir el tamaño de las ventanas de interrogación.

- **Análisis PIV**

Ingresamos a *Analysis -> ANALYZE!*. Podemos Analizar el fotograma actual y comprobar cómo van los ajustes en el par de imágenes seleccionado (ver Figura 43). Y finalmente procedemos analizar todo el conjunto de imágenes.

- **Validación de datos**

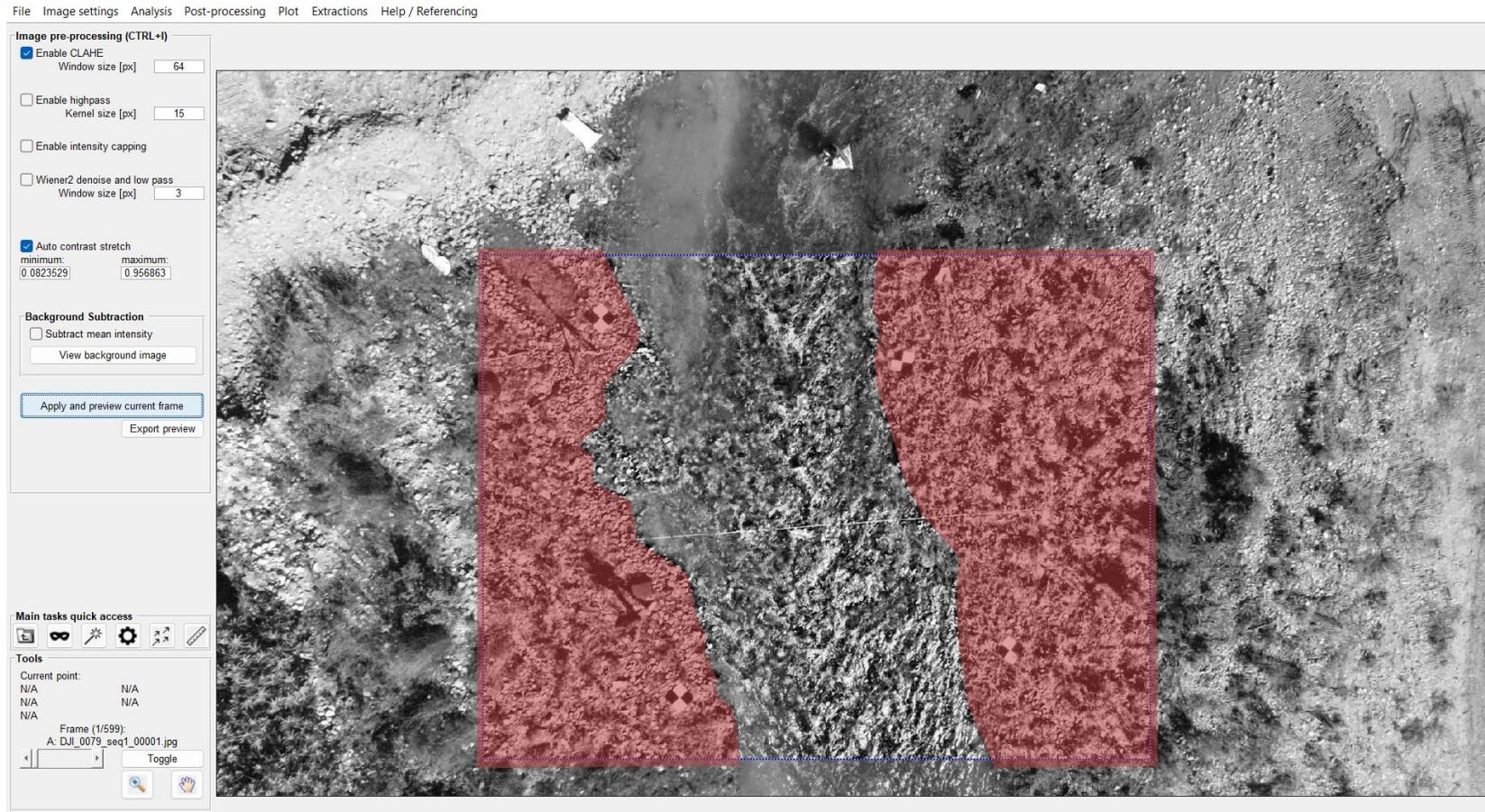
En la validación de datos se corrige algunos vectores erróneos debido a regiones mal iluminadas en la imagen, falta de patrón de siembra en la superficie del agua. Pueden ser eliminados e interpolados seleccionando *Post-processing -> Vector validation*. Aplique la validación haciendo clic en *Apply to all frames* (ver Figura 44).

- **Campo de desplazamiento medio**

Con la finalidad de medir las velocidades a lo largo de una sección es necesario calcular el campo de desplazamiento medio. Desde el menú *Plot>Derive parameters* hacemos clic en aplicar a todos los fotogramas. Los vectores serán de color naranja en el fotograma medido (ver Figura 45).

**Figura 41**

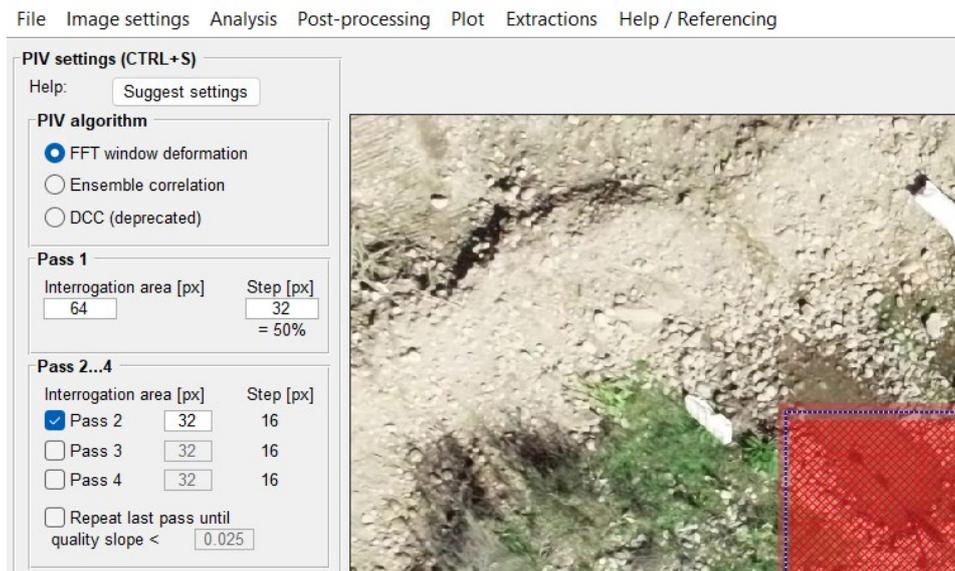
*Ventana gráfica para mejorar el contraste de las imágenes para el análisis PIV.*



*Nota.* En el análisis de la velocidad de la superficie de agua solo se recomienda activar el filtro CLAHE.

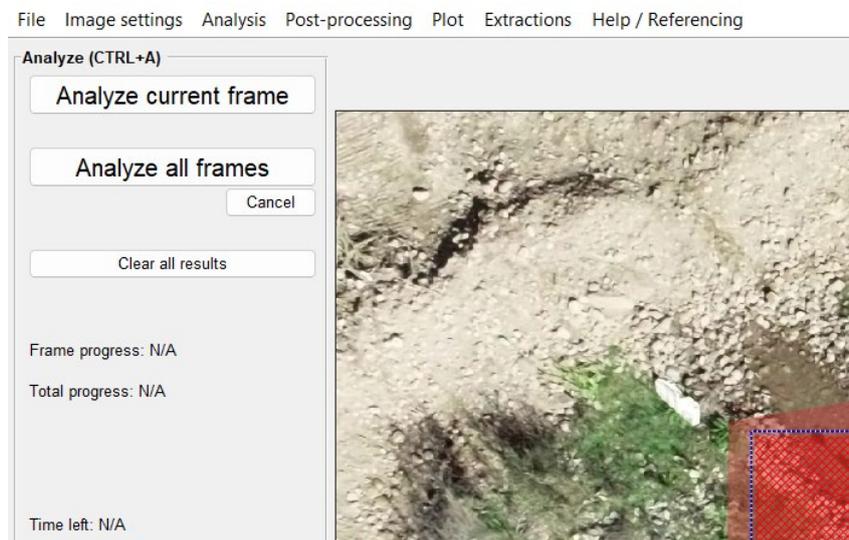
**Figura 42**

*Ventana de selección de algoritmo PIV y establecimiento de ventana de interrogación.*



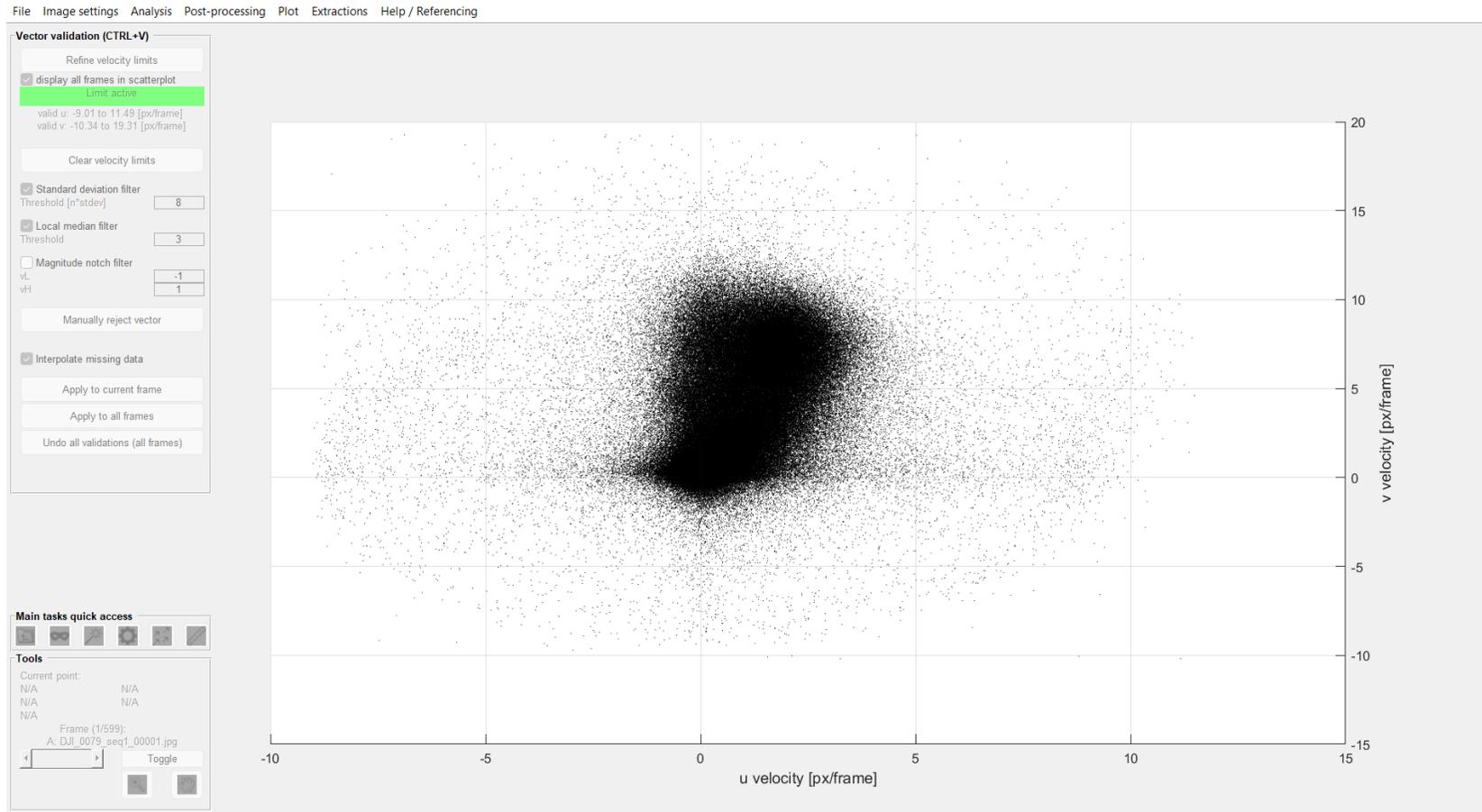
**Figura 43**

*Ventana para analizar el conjunto de imágenes.*



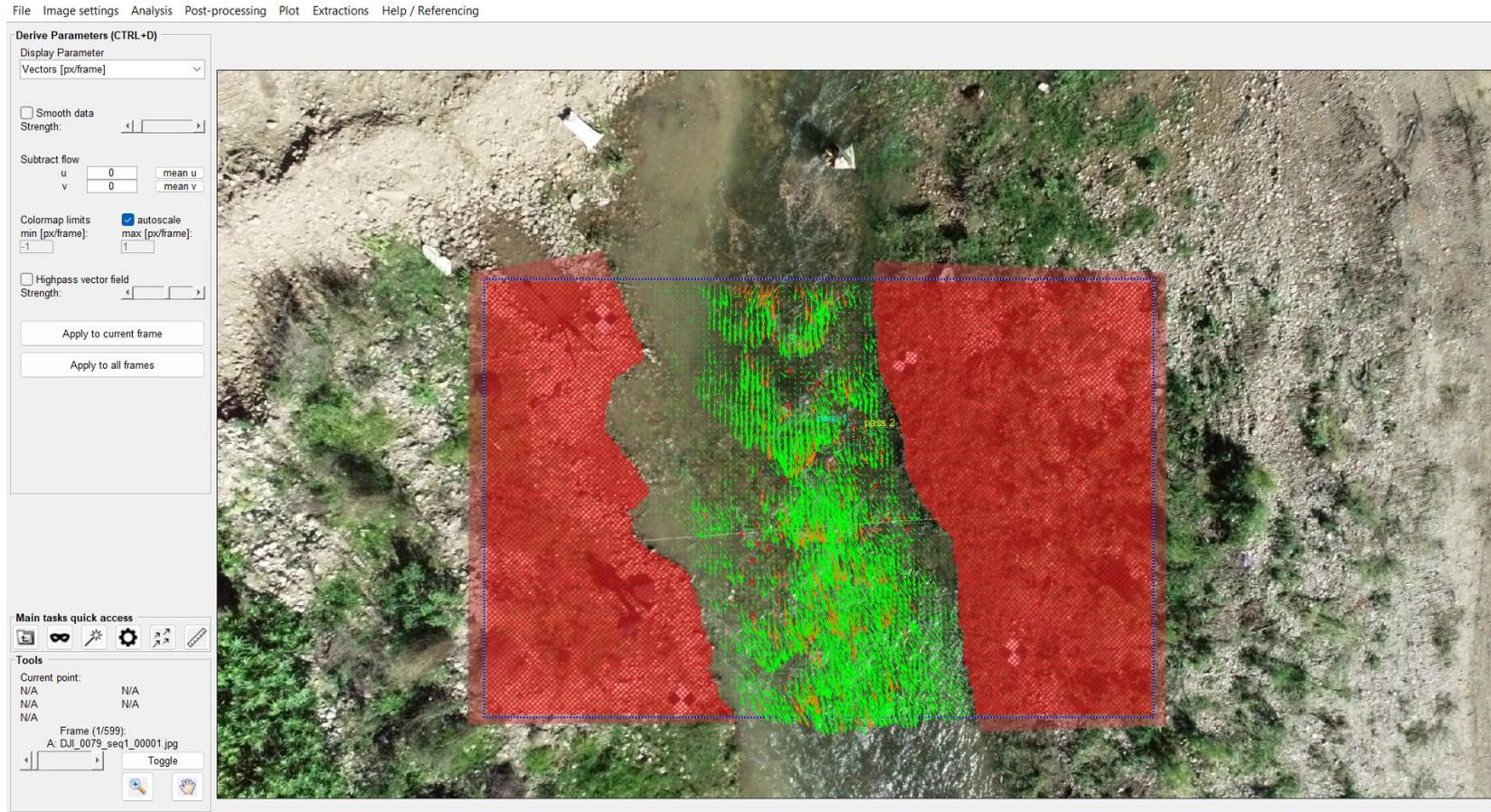
## Figura 44

*Ventada para definir las velocidades límite.*



**Figura 45**

*Campo vectorial medio del conjunto de imágenes.*



- **Guardar PIVlab y volver a RIVeR**

Una vez calculado el campo de desplazamiento medio, guardamos la sesión PIVlab, haciendo clic en *File>Save session*, elegimos un nombre y la ruta del archivo.

- **Cargar sesión de tratamiento de imágenes en RIVeR**

En RIVeR, vamos a *Workflow>Load PIV / PTV analysis* y seleccionamos el archivo de sesión. En la ventana de registro de RIVeR aparece la ruta y el nombre de la sesión cargada (ver Figura 46).

- **Cargar imagen de fondo**

RIVeR rectifica los resultados de la velocimetría de imágenes y se mostrará los resultados rectificadas sobre una única imagen de "fondo" rectificada. Tendrá que elegir o generar esta imagen en *Workflow>Load Background Image* (ver Figura 47).

- **Cargar puntos de control Imagen**

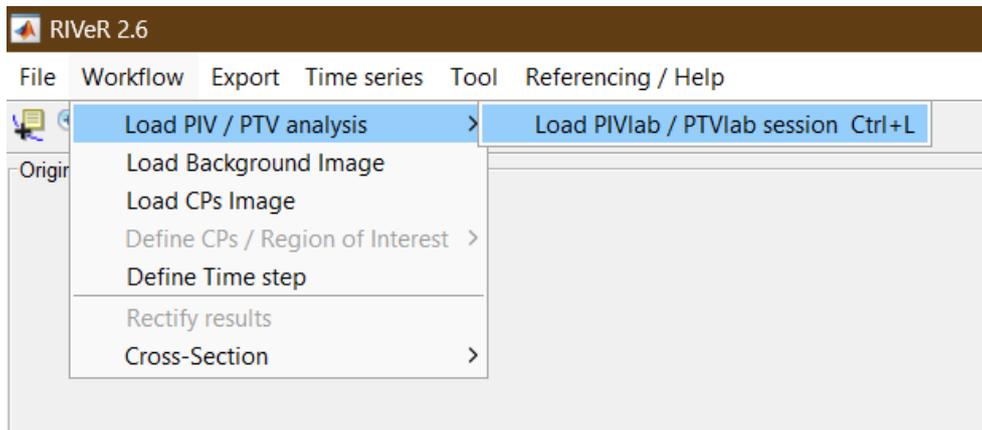
Es necesario identificar los Puntos de Control (CP) que se van a utilizar para la rectificación de resultados. En *Workflow>Load CPs Image*, para ello elegimos una imagen donde los CPs sean visibles (ver Figura 48).

- **Definir los PC y la región de interés**

En la investigación se grabó el video perpendicular al flujo lo que solo es necesario la definición de 4 puntos de control en *Workflow>Define CPs/Region of Interest>Define in a 2D plane>Define distances (if only 4 CPs)* (ver Figura 49). La definición de los puntos de control se inicia en la margen izquierda de la dirección del flujo y se continúa en sentido antihorario. Finalizado ese proceso se selecciona la región de interés para su análisis.

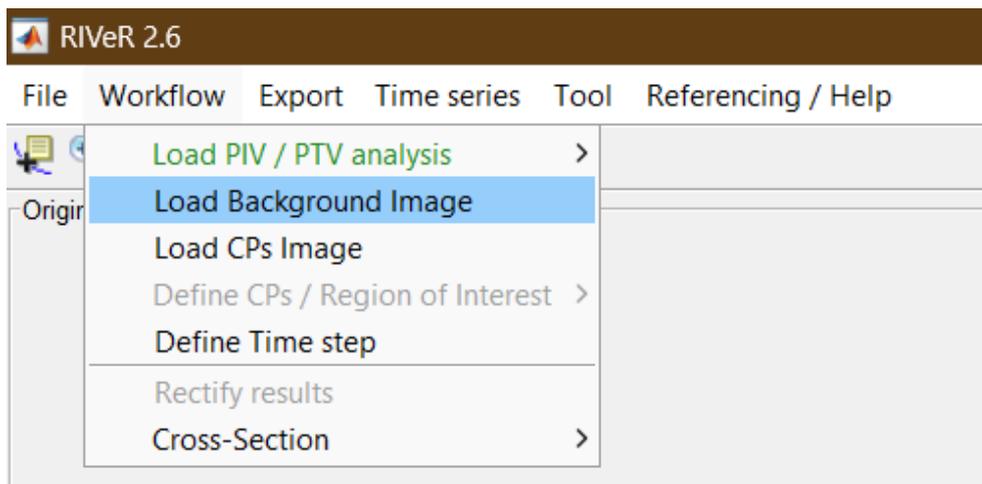
**Figura 46**

*Proceso para cargar la sesión de PIVlab.*



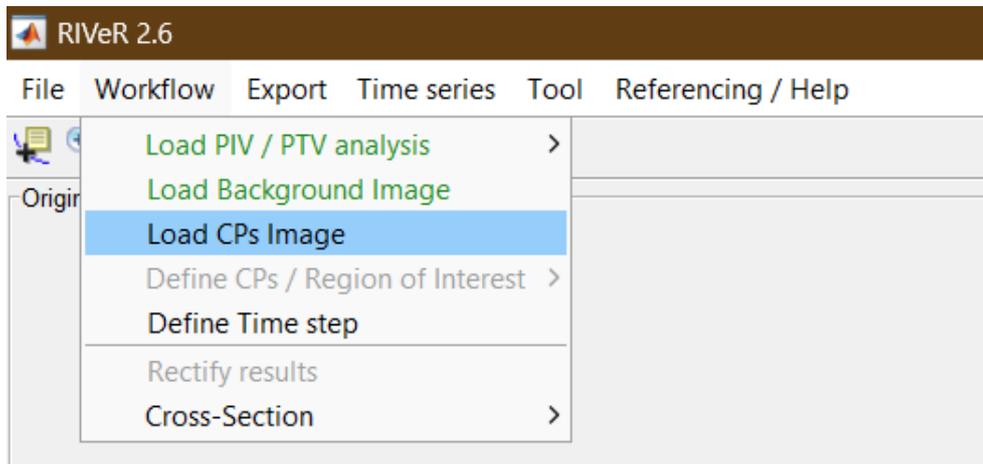
**Figura 47**

*Proceso para la elección de la imagen de fondo rectificada.*



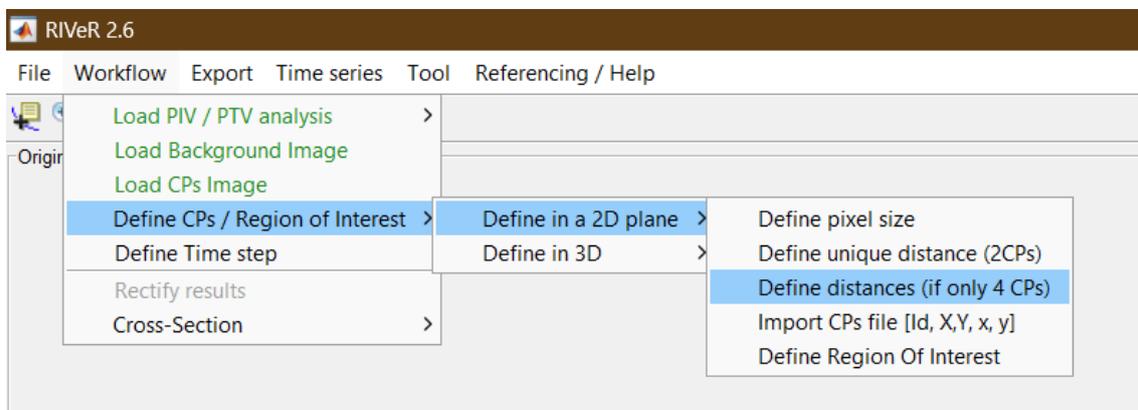
**Figura 48**

*Proceso para la elección de la imagen donde sean visibles los puntos de control.*



**Figura 49**

*Proceso para la definición de los puntos de control para la ortorectificación de las imágenes analizadas.*



## Figura 50

*Definición de las distancias entre los puntos de control.*

The screenshot displays the RIVeR 2.6 software interface, which is used for image rectification and velocity analysis. The interface is divided into several panels:

- Original Panel:** Shows an aerial photograph of a river. A dialog box titled "Fi..." is open, displaying the distances between six control points (1-2, 2-3, 3-4, 4-1, 1-3, 2-4) in various colors. The distances are: 6.315, 9.056, 7.585, 7.813, 9.797, and 11.85. An "Ok" button is visible.
- Rectified Panel:** Shows the same aerial photograph after rectification. The text "RIVeR Rectification of Image Velocity Results" is overlaid on the image. The "Vectors" dropdown menu is set to "N/A".
- Log Window:** Displays the software's log, including session information and file paths. The log text is:

```
30/07/2024 23:31:10  
C:\Users\usuario\Downloads\DATA\SMC\VID01\VID01SMC - 20-03.12.24\  
Session loaded:  
FIVlab session.mat  
30/07/2024 23:31:53  
Automatic Background Image generated.  
30/07/2024 23:32:16  
Control Points Image loaded:  
C:\Users\usuario\Downloads\DATA\SMC\VID01\VID01SMC - 20-03.12.24\DJ1 0079\DJ1 0079 seq1 00562.jpg
```
- Cross Section(s) Panel:** Allows for defining a cross-section. It includes a "Cross Section:" dropdown, a "Delete" button, and input fields for "pixel coordinates" (x, y) and "Real World coordinates" (X, Y). The "length:" and "dist. between samples:" fields are both set to 0. The "# of samples:" field is set to 15.

## Figura 51

Definición de la sección de interés para el análisis y ortorectificación de las imágenes.

The screenshot displays the RIVER 2.6 software interface, which is used for image rectification and velocity analysis. The interface is divided into several panels:

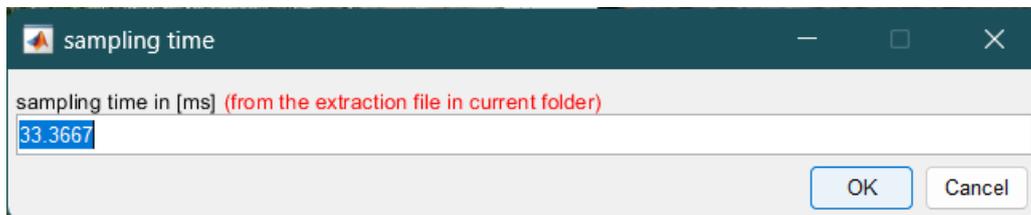
- Original Panel:** Shows a grayscale aerial image of a riverbed. A red trapezoidal region of interest is defined over the river. A color scale on the right indicates pixel size (diagonal) from 0.009 to 0.012. A legend identifies the "region of interest" and "pixel size (diagonal)".
- Rectified Panel:** Shows the same image after rectification, with the RIVER logo and the text "Rectification of Image Velocity Results".
- Log Window:** Displays a log of operations, including the date and time (30/07/2024 23:34:22) and the defined region of interest pixel coordinates:  $x=[1972.78145 \quad 2386.49115 \quad 2865.2761 \quad 1091.50211]$  and  $y=[1773.46375 \quad 814.40192 \quad 1678.1972 \quad 1772.355]$ .
- Cross Section(s) Panel:** Allows defining a cross-section. It includes a "Cross Section" name field, a "Delete" button, and input fields for "pixel coordinates" (left and right x/y) and "Real World coordinates" (left and right X/Y). The "length" and "dist. between samples" are currently set to 0, and the "# of samples" is set to 15.

- **Definición del paso de tiempo**

Los resultados obtenidos durante el tratamiento de imágenes son “píxeles por fotograma”. Para obtener velocidades es necesario definir el tiempo entre cada fotograma. En *Workflow>Define Time Step* puede escribir el tiempo en [ms] entre sus fotogramas. Si ha extraído las imágenes de una película con RIVeR y su sesión PIVlab/PTVlab está en la misma carpeta que su imagen, el paso de tiempo será ya sugerido.

**Figura 52**

*Paso de tiempo sugerido para el tratamiento del conjunto de imágenes.*

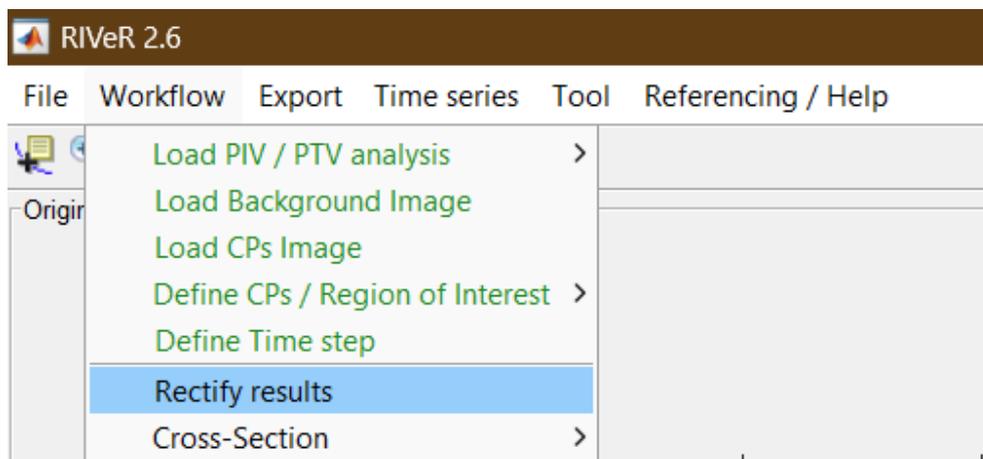


- **Rectificación de resultados**

Una vez completado los pasos anteriores, rectificamos los resultados en la sección *Workflow* y deben aparecer en verde en el menú. Vamos a *Workflow>Rectify results*. Los resultados y la Imagen de Fondo se rectificarán y se mostrarán en el panel izquierdo de la ventana de RIVeR. También puede elegir trazar solo Vectores o Vectores y Magnitud desde el menú emergente del mismo panel.

**Figura 53**

*Proceso para la rectificación de resultados.*



## Figura 54

En la ventana de la margen derecha se observa los resultados rectificadas.

The screenshot displays the RIVeR 2.6 software interface. The main window is divided into four quadrants:

- Top Left (Original):** Shows an aerial photograph of a riverbank with some white markers.
- Top Right (Rectified):** Shows the same aerial image after a perspective correction. A white line indicates the river's path, and numerous blue arrows (vectors) are overlaid on the image, pointing in the direction of flow. The text "Rectified" and "Result: 1/599" is visible at the top of this panel.
- Bottom Left (Log Window):** Contains a text log with the following data:

```
Pixel coordinates [Left bank   Right bank]
x=[1171.232   2405.827]
y=[1398.9673   1311.9231]

Real World coordinates [Left bank   Right bank]
X=[5.7038   -3.3351]
Y=[5.148   3.3969]

total length (Real World): 9.207
number of samples: 15
distance between samples: 0.65764
```

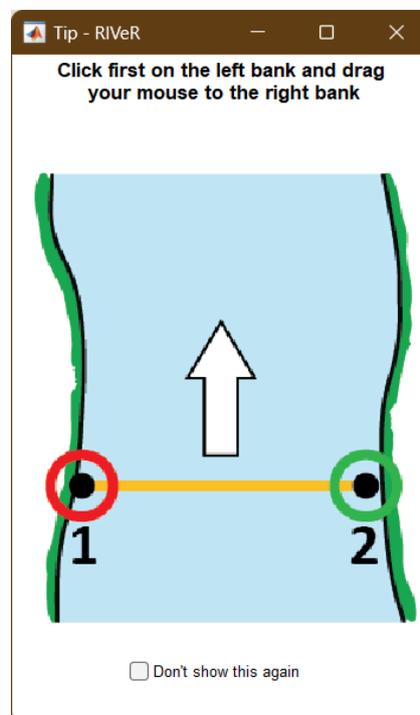
Buttons for "Clear Log" and "Save Log" are located at the bottom of this window.
- Bottom Right (Plot Settings):** Contains configuration options for the visualization:
  - Vector Colors [0.255]:** R: 0, G: 114, B: 189.
  - Mesh:** m: 40, n: 40, size: 1.
  - Colorbar limits:**  Auto, min: 0, max: 0.
  - Colormap:** RIVeR (dropdown menu).
  - Trajectories ID:** (empty text field).
  - show CPs.

- **Estimación de la velocidad superficial en una sección transversal**

Una vez rectificadas los resultados, definimos una o varias Secciones Transversales en la que podemos observar la velocidad y el caudal, en esta investigación nos centramos solo en la velocidad. Ingresamos a *Workflow>Cross section>Add New>Define Cross-Section* y definimos la sección transversal en la imagen original o la imagen rectificada. Además, esta sección puede ser definido haciendo clic primero en el margen izquierdo y arrastre el ratón hacia el margen derecho, como se muestra a continuación. Haga doble clic para confirmar la Sección transversal.

**Figura 55**

*Recomendación para la definición de la sección transversal.*



**Figura 56**

*Sección transversal definida para la determinación de la velocidad superficial.*

The screenshot displays the RIVER 2.6 software interface. The main window is divided into several sections:

- Original:** A large satellite image of a river with a yellow line indicating a cross-section across the water. The x-axis at the bottom ranges from 500 to 3500.
- Rectified:** A zoomed-in view of the cross-section area, showing a yellow line across the river with blue arrows indicating flow direction. A red dot marks the left bank, and a white dot marks the right bank. A scale bar labeled '3' is visible in the bottom left.
- Log Window:** A text area containing the following data:

```
Pixel coordinates [Left bank Right bank]
x=[2112.0004 1237.403]
y=[1330.7918 1399.997]

Real World coordinates [Left bank Right bank]
X=[-0.99171 5.266]
Y=[3.8346 5.1093]

total length (Real World): 6.3862
number of samples: 15
distance between samples: 0.45616
```
- Cross Section(s):** A control panel for the cross-section, labeled 'CS\_1'. It includes a 'Delete' button, a '2/2' indicator, and two tables of coordinates:

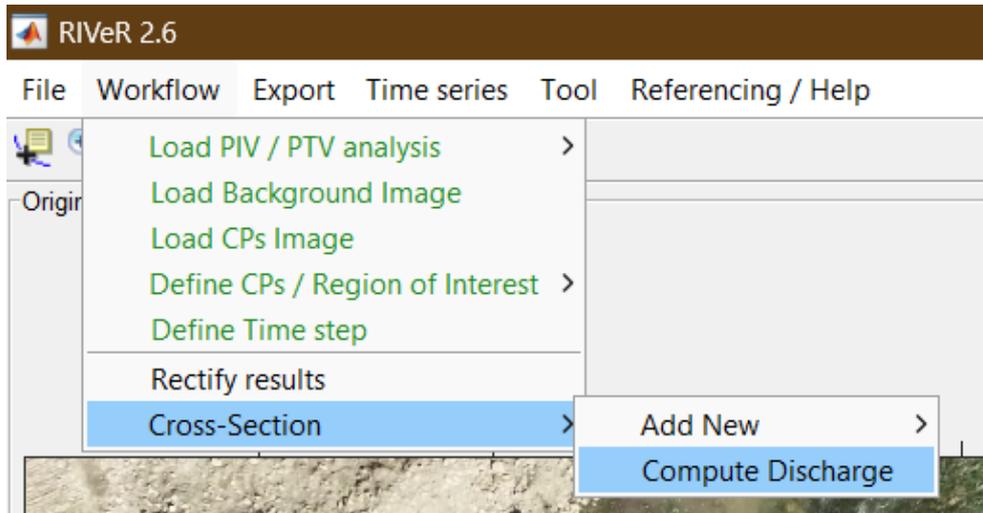
	x	y
left	2112.0	1330.8
right	1237.4	1399.9

	X	Y
left	-0.99171	3.8346
right	5.266	5.1093
- Summary:** On the right side of the Cross Section(s) panel, the following values are displayed:
  - length: 6.3862
  - dist. between samples: 0.4561
  - # of samples: 15

Para poder ver los resultados ingresamos a *Workflow*>*Cross section*>*Compute Discharge* y se abrirá otra ventana con la información requerida.

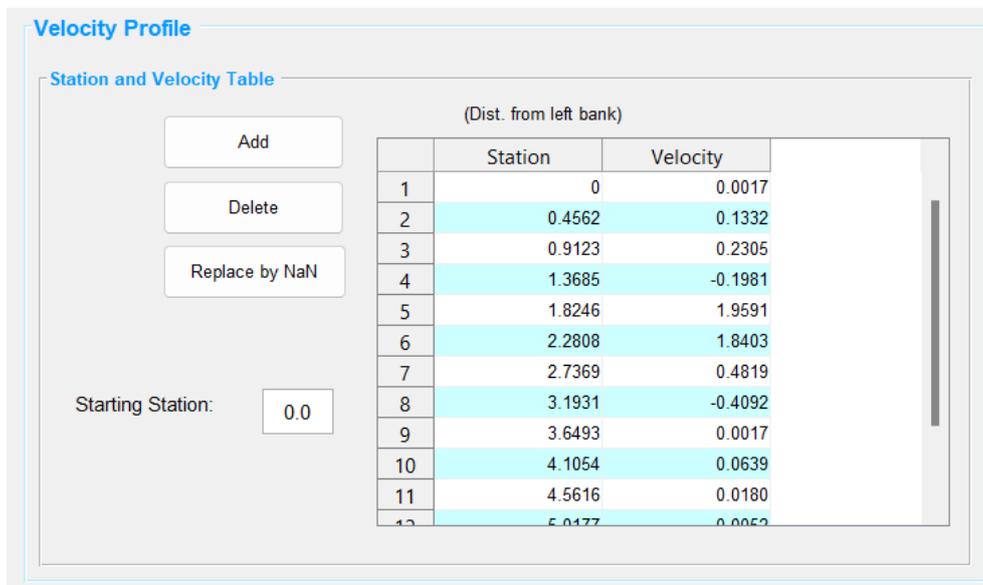
**Figura 57**

*Proceso para la obtención de los resultados de la velocidad superficial en la sección anteriormente definida.*



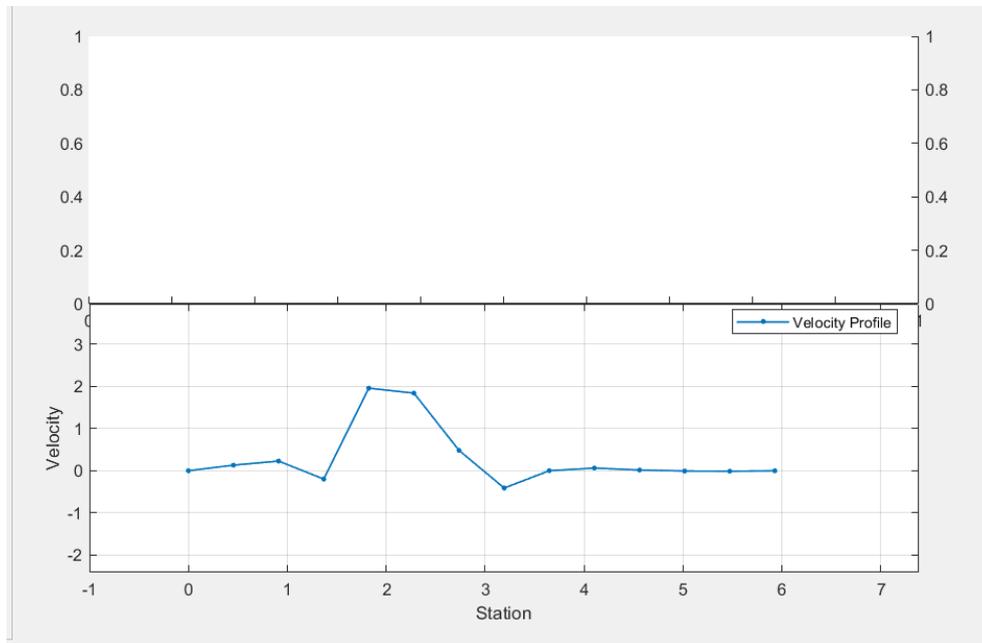
**Figura 58**

*Distribución de velocidades de la sección definida.*



**Figura 59**

*Perfil de velocidades de la sección definida*



## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo de la investigación se describen los resultados obtenidos en las tres campañas realizadas. La primera campaña se llevó a cabo del 14 al 17 de octubre, la segunda campaña tuvo lugar entre el 11 y el 14 de noviembre, y la tercera campaña se desarrolló del 16 al 19 de diciembre. En cada experimento, la velocidad de superficie se midió mediante LSPIV con vehículos aéreos no tripulados y se comparó con los resultados de la medición utilizando el método del correntómetro. El propósito de la planificación experimental se divide principalmente en tres elementos:

- Se analizaron y compararon los resultados de las mediciones realizadas con el método LSPIV con fotografía aérea mediante UAV y el método del correntómetro.
- En cada experimento, se utilizó un UAV para capturar la superficie del agua del río a tres alturas de vuelo diferentes (20, 30 y 40 metros) y se compararon los resultados de las mediciones.
- Se sembraron partículas artificiales o trazadores (viruta de madera) en la superficie del agua del río.
- La velocidad superficial mediante la técnica sofisticada LSPIV, se calculó empleando los programas RIVeR y PIVlab, los cuales utilizan las ecuaciones (1) a (7) descritas en el marco teórico.
- El análisis del error estadístico se realizó utilizando las ecuaciones (13), (15) y (16).

### **4.1. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) primera campaña**

Las mediciones se llevaron a cabo del 14 al 17 de octubre de 2023, en condiciones de bajo flujo. Además, el flujo presentaba alto transporte de sedimentos, ya que se estaba dando el inicio de las lluvias en las partes altas. La campaña incluye fotografías aéreas de vehículos aéreos no tripulados a alturas de vuelo de 20 m, 30 m y 40 m y mediciones con correntómetro. Además, se sembraron partículas artificiales (viruta de madera).

#### **4.1.1. Resultados de la medición del 14 de octubre de 2023**

La Tabla 6 muestra el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Los resultados indican que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 6**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 14-10-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.18	0.11	0.14	0.08
P2	0.88	0.83	0.73	0.73
P3	0.83	0.86	0.78	0.77
P4	0.90	0.84	0.80	0.73
P5	0.12	0.10	0.08	0.10
MAPE		15.03%	19.25%	24.53%
MAE		0.05	0.08	0.10
R-RMSE		4.97%	8.88%	11.72%

La Tabla 7 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.58 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.55 m/s a 20 m, 0.50 m/s a 30 m y 0.48 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores similares entre ambos métodos.

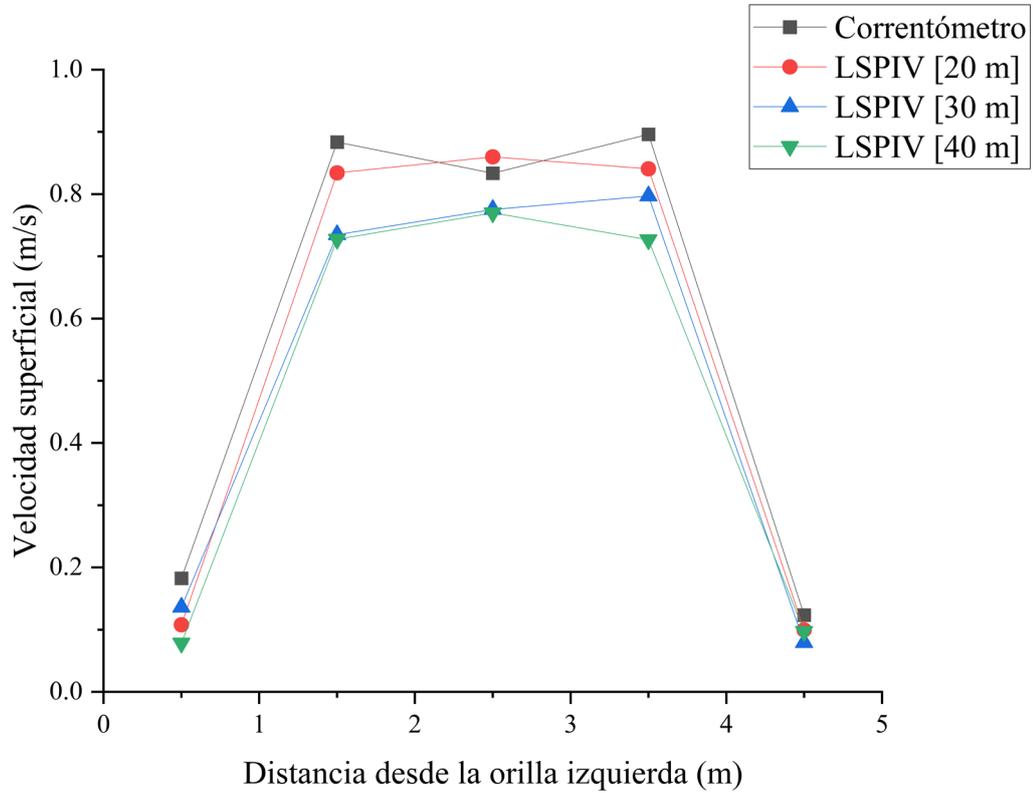
**Tabla 7**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 14-10-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.58
LSPIV [20 m]	0.55
LSPIV [30 m]	0.50
LSPIV [40 m]	0.48

**Figura 60**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 14-10-23.*



#### 4.1.2. Resultados de la medición del 15 de octubre de 2023

La Tabla 8 muestra el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Al igual que en el primer análisis los resultados indican que el método LSPIV es más preciso a menor altitud de vuelo (20 m).

**Tabla 8**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 15-10-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.35	0.24	0.30	0.20
P2	0.57	0.55	0.49	0.42
P3	0.60	0.71	0.49	0.58
P4	0.62	0.72	0.54	0.65
P5	0.83	0.81	0.72	0.76
P6	0.87	0.81	0.76	0.65
P7	0.74	0.71	0.58	0.62
P8	0.47	0.46	0.35	0.38
MAPE		10.43%	16.63%	18.24%
MAE		0.06	0.10	0.11
R-RMSE		0.07	0.11	0.12

La Tabla 9 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.632 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.626 m/s a 20 m, 0.528 m/s a 30 m y 0.532 m/s a 40 m.

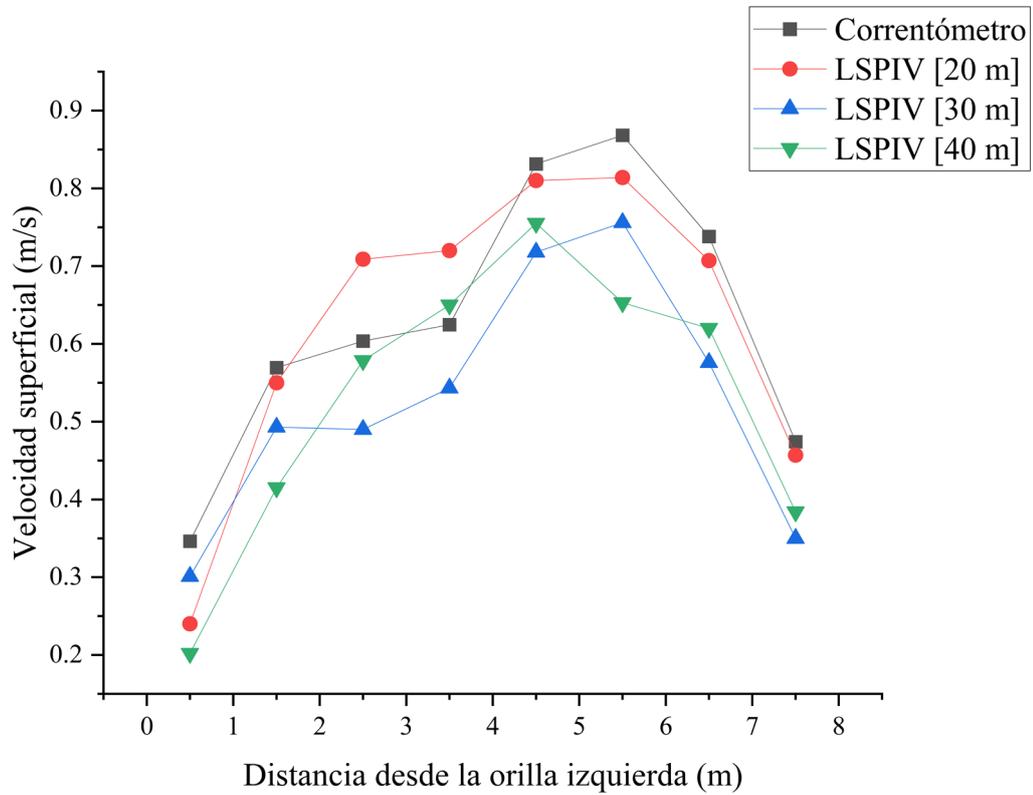
**Tabla 9**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 15-10-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.632
LSPIV [20 m]	0.626
LSPIV [30 m]	0.528
LSPIV [40 m]	0.532

**Figura 61**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 15-10-23.*



#### **4.1.3. Resultados de la medición del 16 de octubre de 2023**

La Tabla 10 muestra el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Se observa que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 10**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 16-10-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.45	0.44	0.31	0.23
P2	0.62	0.46	0.53	0.43
P3	0.74	0.54	0.61	0.54
P4	0.59	0.56	0.65	0.53
P5	0.56	0.53	0.54	0.42
P6	0.24	0.29	0.36	0.23
P7	0.16	0.21	0.15	0.20
MAPE		16.26%	18.98%	24.35%
MAE		0.08	0.08	0.12
R-RMSE		10.17%	9.33%	14.54%

La Tabla 11 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.48 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.43 m/s a 20 m, 0.45 m/s a 30 m y 0.37 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores similares entre ambos métodos. La Figura 58 muestra el perfil de la distribución de velocidades

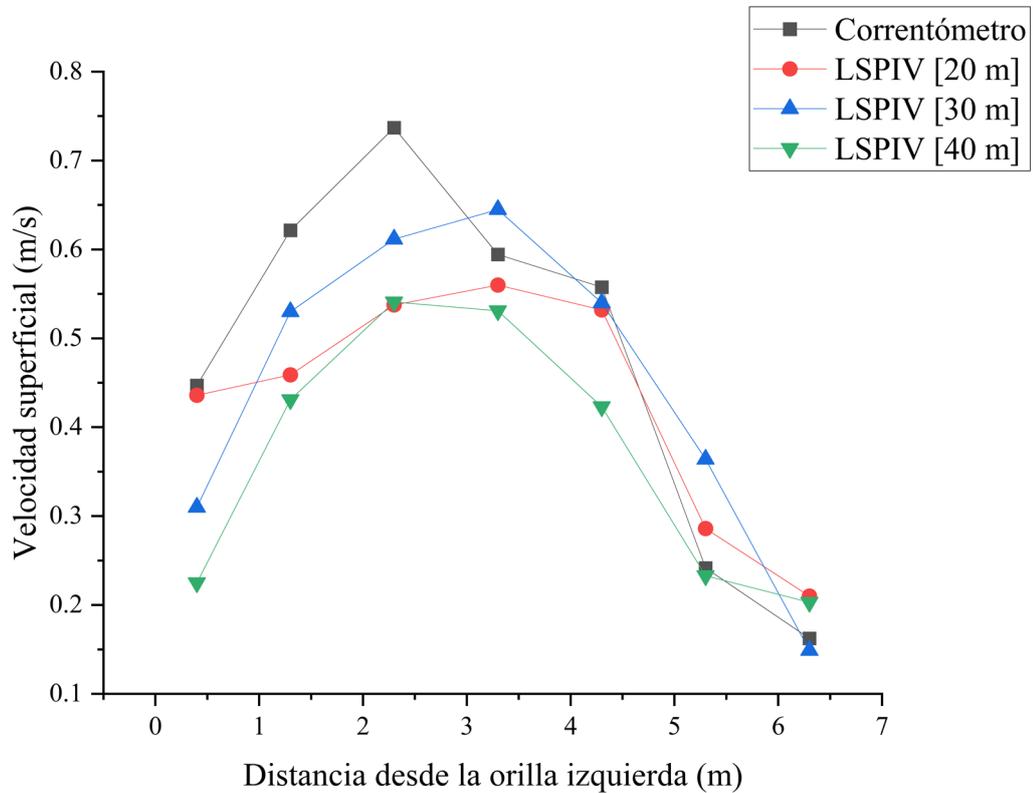
**Tabla 11**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 16-10-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.48
LSPIV [20 m]	0.43
LSPIV [30 m]	0.45
LSPIV [40 m]	0.37

**Figura 62**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 16-10-23.*



#### 4.1.4. Resultados de la medición del 17 de octubre de 2023

La Tabla 12 muestra el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Observamos que el método LSPIV tiene mejores resultados a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 12**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 17-10-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.00	0.00
P2	0.00	0.00
P3	0.22	0.16
P4	0.20	0.22
P5	0.28	0.30
P6	0.27	0.33
P7	0.30	0.35
P8	0.34	0.32
P9	0.29	0.27
P10	0.26	0.22
P11	0.24	0.19
P12	0.06	0.10
P13	0.06	0.05
MAPE		29.73%
MAE		0.03
R-RMSE		3.43%

La Tabla 13 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.180 m/s, y el método LSPIV a 40 m tiene un valor de 0.194 m/s a. Los resultados muestran valores semejantes entre ambos métodos. La Figura 63 muestra el perfil de la distribución de velocidades

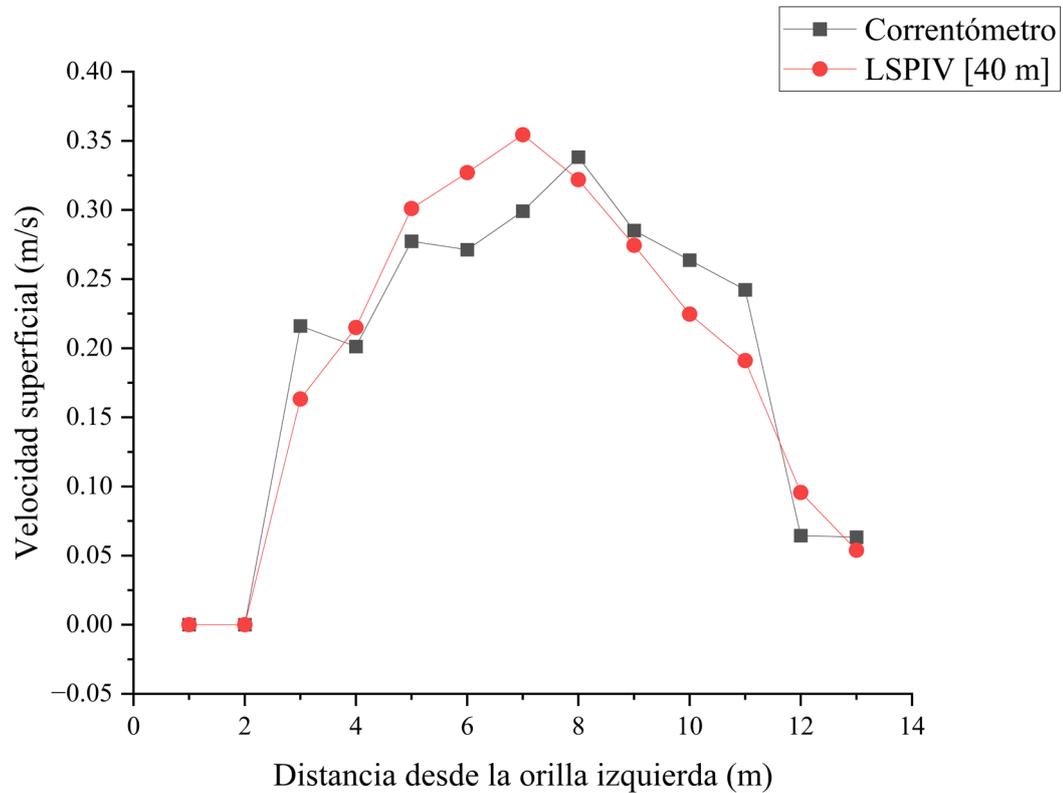
**Tabla 13**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 17-10-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.180
LSPIV [40 m]	0.194

**Figura 63**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 17-10-23.*



#### **4.2. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) segunda campaña**

Las mediciones se llevaron a cabo del 11 al 14 de noviembre de 2023, en condiciones de aguas claras. Los videos se grabaron con vehículos aéreos no tripulados (drone) a alturas de vuelo de 20 m, 30 m y 40 m y mediciones con correntómetro. Asimismo, se sembraron partículas artificiales (viruta de madera).

##### **4.2.1. Resultados de la medición del 11 de noviembre de 2023**

La Tabla 14 detalla el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Se muestra que el método LSPIV

tiene mejores resultados a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 14**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 11-11-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.00	0.00	0.00	0.00
P2	0.60	0.57	0.53	0.39
P3	0.77	0.71	0.64	0.67
P4	0.99	0.91	0.86	0.84
P5	1.34	1.12	1.04	1.01
P6	0.98	0.96	0.83	0.86
P7	0.49	0.37	0.32	0.33
P8	0.00	0.00	0.00	0.00
MAPE		7.84%	14.51%	16.57%
MAE		0.06	0.12	0.13
R-RMSE		9.41%	15.14%	16.60%

La Tabla 15 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.65 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.58 m/s a 20 m, 0.53 m/s a 30 m y 0.51 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores cercanos entre ambos métodos. La Figura 64 muestra el perfil de la distribución de velocidades

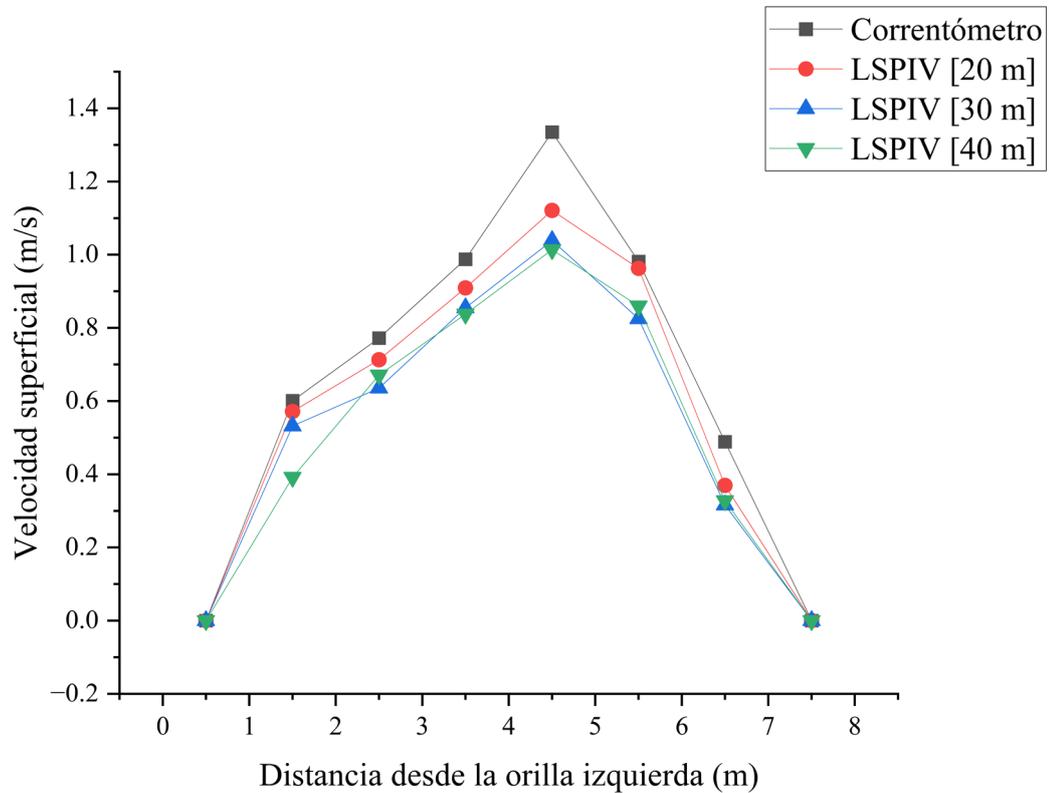
**Tabla 15**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 11-11-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.65
LSPIV [20 m]	0.58
LSPIV [30 m]	0.53
LSPIV [40 m]	0.51

**Figura 64**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 11-11-23.*



#### 4.2.2. Resultados de la medición del 12 de noviembre de 2023

La Tabla 16 resume el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Se muestra que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 16**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 12-11-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.06	0.05	0.04	0.07
P2	0.25	0.26	0.31	0.29
P3	0.53	0.58	0.62	0.66
P4	0.75	0.75	0.70	0.63
P5	0.83	0.92	0.75	0.82
P6	1.19	1.15	1.27	1.19
P7	1.33	1.38	1.41	1.32
P8	1.18	1.14	1.24	1.35
P9	1.13	1.14	1.13	1.26
P10	1.17	1.13	1.05	1.06
P11	0.35	0.38	0.16	0.61
MAPE		6.15%	15.02%	16.79%
MAE		0.03	0.07	0.09
R-RMSE		4.05%	8.77%	9.42%

La Tabla 17 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.80 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.81 m/s a 20 m, 0.79 m/s a 30 m y 0.84 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores similares entre ambos métodos. La Figura 65 muestra el perfil de la distribución de velocidades

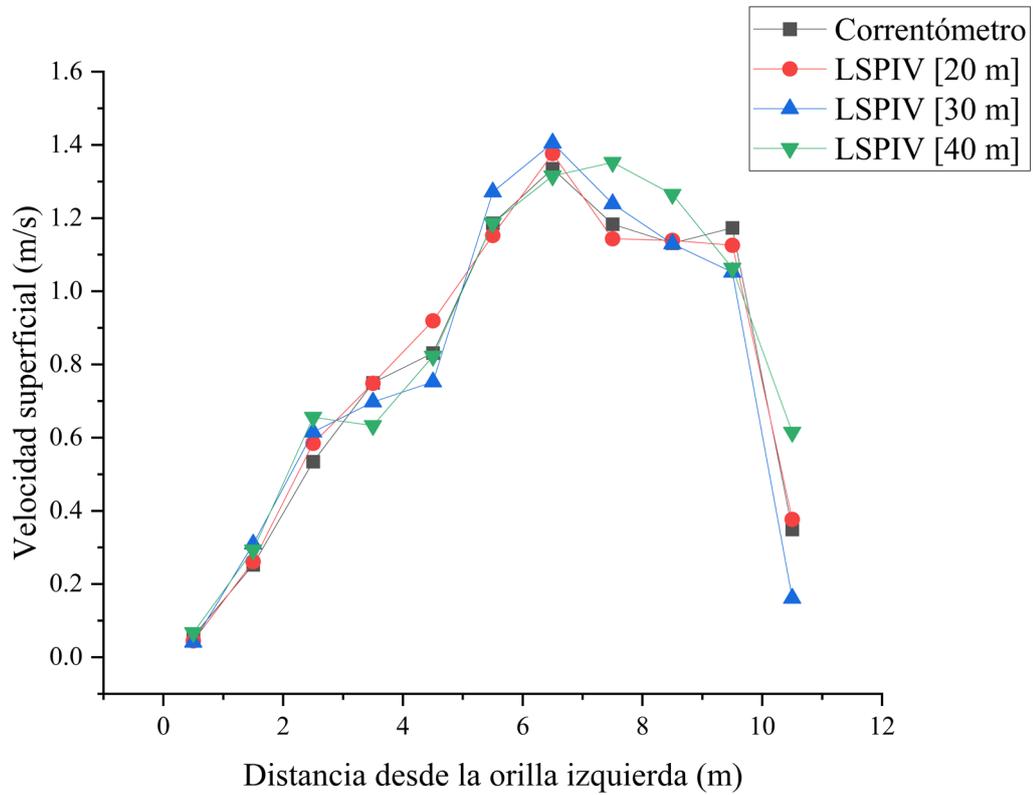
**Tabla 17**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 12-11-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.80
LSPIV [20 m]	0.81
LSPIV [30 m]	0.79
LSPIV [40 m]	0.84

**Figura 65**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 12-11-23.*



#### 4.2.3. Resultados de la medición del 13 de noviembre de 2023

En la Tabla 18 se presentan los resultados del análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Podemos ver que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 18**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 13-11-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.14	0.17	0.12	0.24
P2	0.81	0.86	0.86	0.91
P3	0.93	0.85	0.99	1.08
P4	0.60	0.71	0.75	0.70
P5	0.58	0.43	0.73	0.66
P6	0.44	0.53	0.55	0.54
P7	0.41	0.48	0.52	0.55
P8	0.00	0.00	0.00	0.00
MAPE		14.29%	16.12%	23.53%
MAE		0.07	0.08	0.10
R-RMSE		8.33%	9.75%	10.66%

La Tabla 19 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.49 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.50 m/s a 20 m, 0.56 m/s a 30 m y 0.59 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores cercanos entre ambos métodos. La Figura 66 muestra el perfil de la distribución de velocidades

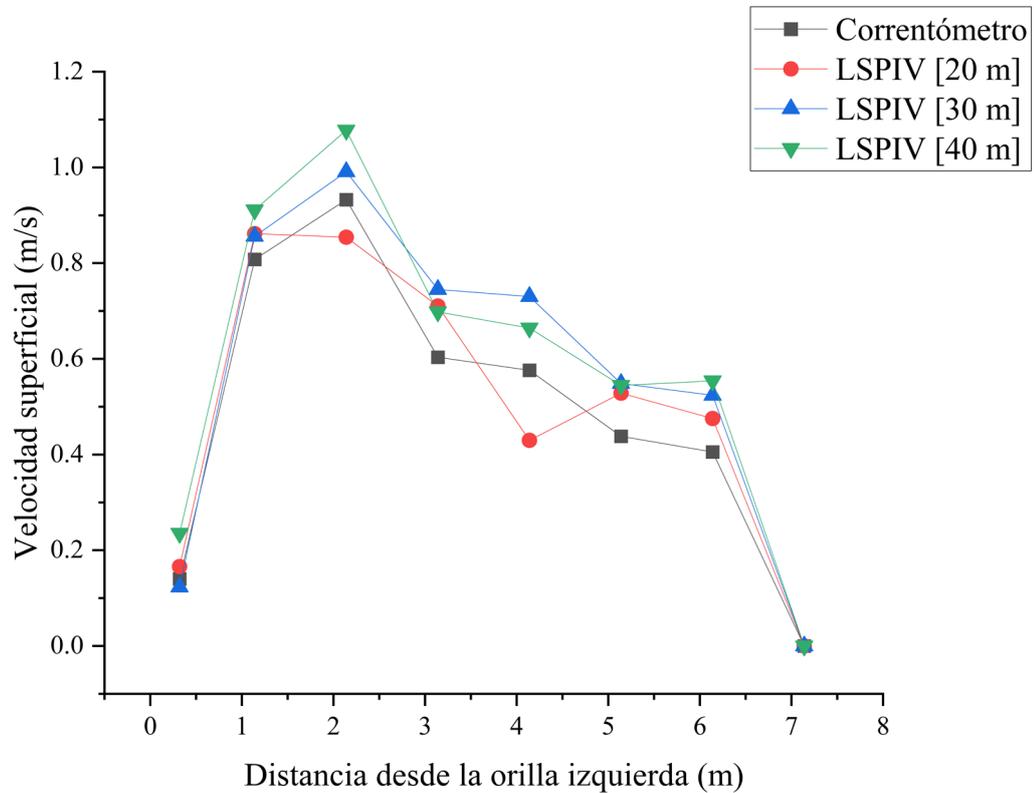
**Tabla 19**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 13-11-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.49
LSPIV [20 m]	0.50
LSPIV [30 m]	0.56
LSPIV [40 m]	0.59

**Figura 66**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 13-11-23.*



#### 4.2.4. Resultados de la medición del 14 de noviembre de 2023

En Tabla 20 se exhiben los resultados del análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Se concluye que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 20**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 14-11-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.00	0.00	0.00	0.00
P2	0.09	0.06	0.03	0.02
P3	0.24	0.29	0.30	0.14
P4	0.41	0.47	0.41	0.15
P5	0.44	0.40	0.40	0.44
P6	0.40	0.41	0.41	0.45
P7	0.40	0.43	0.51	0.69
P8	0.40	0.37	0.34	0.38
P9	0.33	0.36	0.41	0.25
P10	0.31	0.17	0.37	0.35
P11	0.24	0.24	0.18	0.22
P12	0.00	0.00	0.00	0.00
P13	0.00	0.00	0.00	0.00
P14	0.00	0.00	0.00	0.00
MAPE		10.49%	14.85%	22.37%
MAE		0.03	0.04	0.07
R-RMSE		4.73%	4.99%	11.06%

La Tabla 21 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.233 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.229 m/s a 20 m, 0.240 m/s a 30 m y 0.221 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores próximos entre ambos métodos. La Figura 67 muestra el perfil de la distribución de velocidades

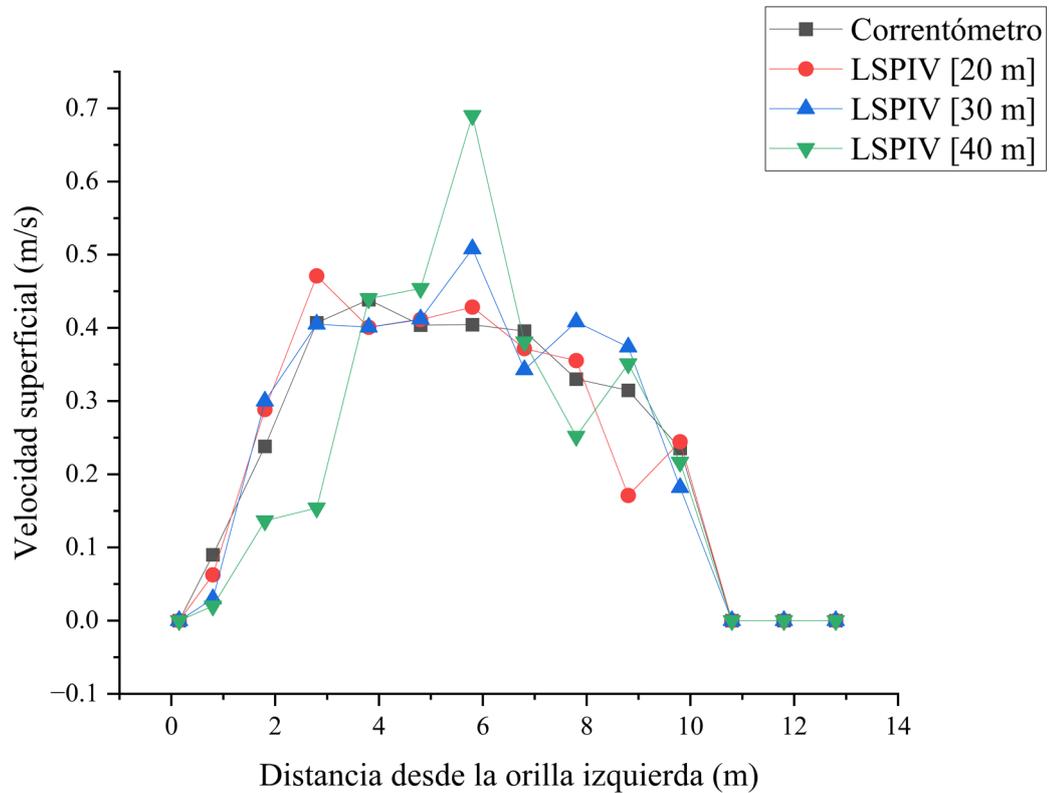
**Tabla 21**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 14-11-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.233
LSPIV [20 m]	0.229
LSPIV [30 m]	0.240
LSPIV [40 m]	0.221

**Figura 67**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 14-11-23.*



### **4.3. Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) tercera campaña**

Las mediciones se llevaron a cabo del 16 al 19 de diciembre de 2023, en condiciones de aguas turbias (descarga de aguas residuales). Los videos se grabaron la ayuda de un dron a alturas de vuelo de 20 m, 30 m y 40 m y mediciones con correntómetro. Asimismo, se sembraron partículas artificiales (viruta de madera).

#### **4.3.1. Resultados de la medición del 16 de diciembre de 2023**

En Tabla 22 se pone a la vista los resultados del análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Se

observa que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 22**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 01 medido el 16-12-23.*

Punto	Correntómetro (m/s)	LSPIV [20 m] (m/s)	LSPIV [30 m] (m/s)	LSPIV [40 m] (m/s)
P1	0.51	0.37	0.64	0.25
P2	0.62	0.57	0.62	0.56
P3	0.77	0.56	0.76	0.49
P4	0.74	0.65	0.53	0.65
P5	0.57	0.71	0.62	0.75
P6	0.74	0.74	0.65	0.67
P7	0.56	0.73	0.87	0.93
P8	0.65	0.62	0.80	0.95
P9	0.54	0.73	0.64	0.90
P10	0.63	0.83	0.45	0.88
P11	0.89	0.93	0.71	0.77
P12	0.62	0.81	1.01	0.71
P13	0.88	0.73	0.80	0.65
P14	0.94	0.93	0.80	0.74
P15	0.88	0.87	0.80	0.56
P16	0.86	0.82	0.73	0.51
P17	0.89	0.85	0.73	0.60
P18	0.62	0.57	0.31	0.44
MAPE		17.08%	21.31%	29.91%
MAE		0.11	0.15	0.21
R-RMSE		14.75%	19.20%	24.68%

La Tabla 23 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.716 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.724 m/s a 20 m, 0.693 m/s a 30 m y 0.668 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores cercanos entre ambos métodos. La Figura 68 muestra el perfil de la distribución de velocidades

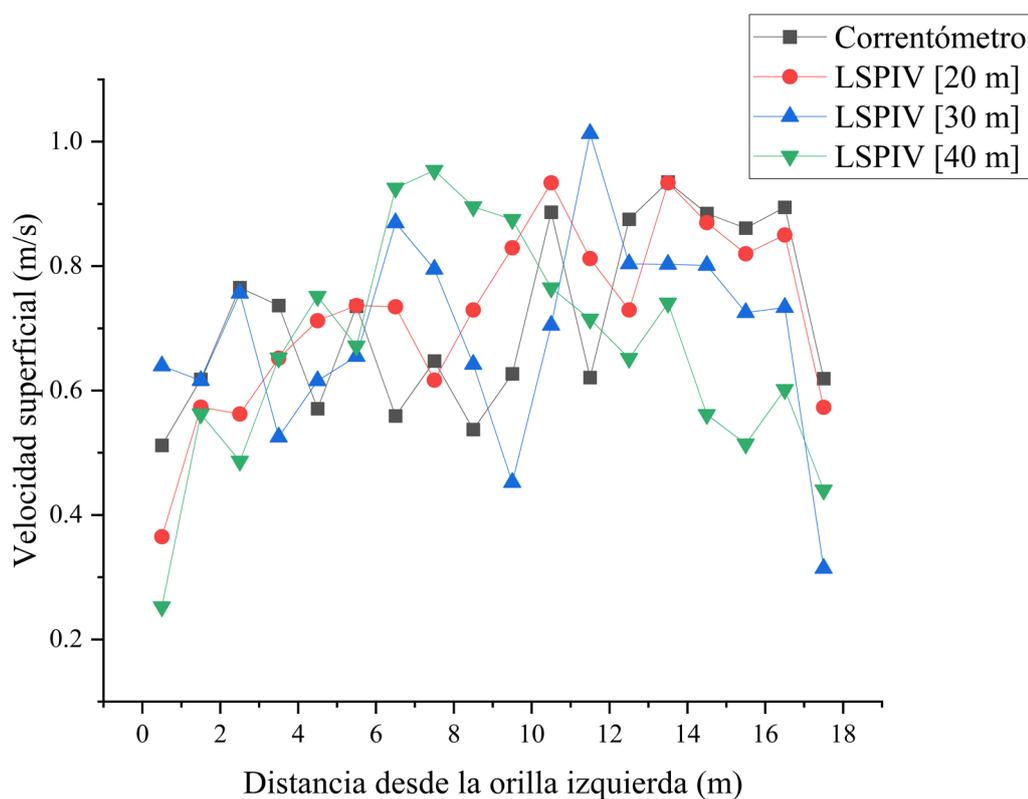
**Tabla 23**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 01 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 16-12-23.*

Método	Velocidad promedio (m/s)
Correntómetro	0.716
LSPIV [20 m]	0.724
LSPIV [30 m]	0.693
LSPIV [40 m]	0.668

**Figura 68**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 01 medido el 16-12-23.*



#### 4.3.2. Resultados de la medición del 17 de diciembre de 2023

La Tabla 24 muestra los resultados del análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes alturas. Se presta atención en

que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 24**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 02 medido el 17-12-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
P1	0.00	0.00	0.00	0.00
P2	0.80	0.43	0.15	0.64
P3	0.59	0.48	0.57	1.17
P4	0.98	0.86	1.44	1.12
P5	1.06	1.09	1.64	1.31
P6	1.01	1.14	1.07	1.89
P7	0.90	0.82	0.95	1.09
P8	0.96	0.97	0.93	1.11
P9	0.93	0.83	0.92	0.81
P10	1.00	0.92	0.87	0.97
P11	0.67	0.89	0.52	0.61
MAPE		14.12%	21.64%	27.85%
MAE		0.11	0.19	0.23
R-RMSE		15.13%	30.39%	34.52%

La Tabla 25 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.81 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.77 m/s a 20 m, 0.82 m/s a 30 m y 0.97 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores adyacentes entre ambos métodos. La Figura 69 muestra el perfil de la distribución de velocidades

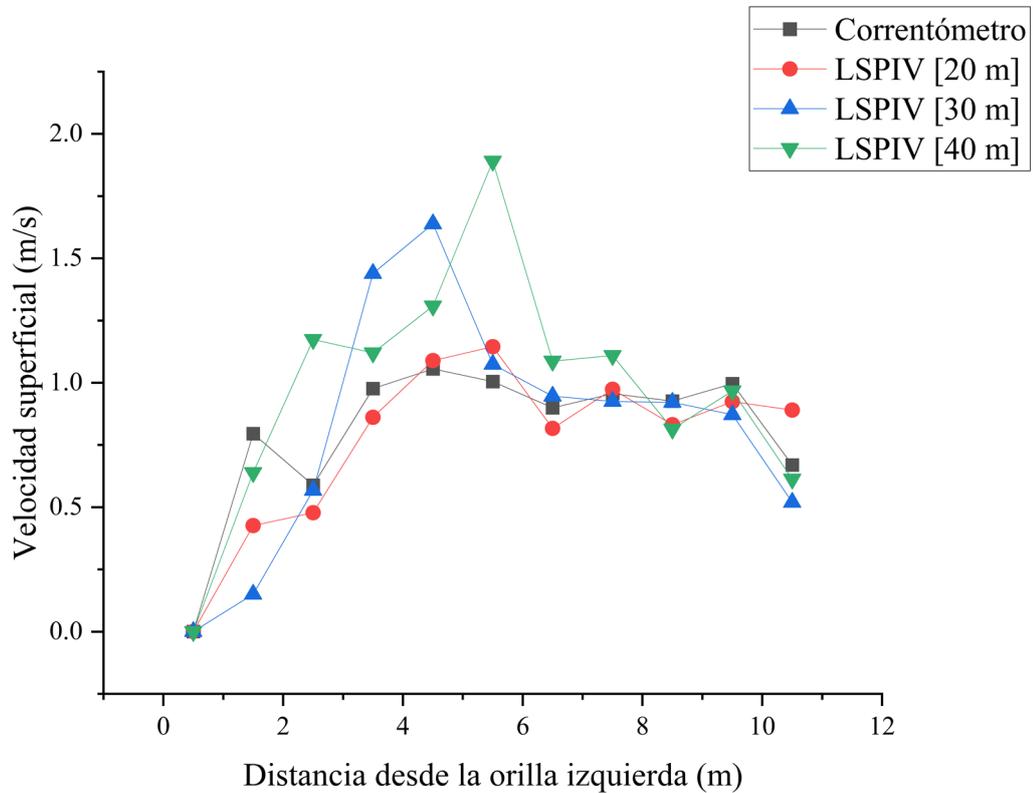
**Tabla 25**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 02 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 17-12-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.81
LSPIV [20 m]	0.77
LSPIV [30 m]	0.82
LSPIV [40 m]	0.97

**Figura 69**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 02 medido el 17-12-23.*



#### 4.3.3. Resultados de la medición del 18 de diciembre de 2023

La Tabla 26 resume el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. Donde el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 26**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 03 medido el 18-12-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.22	0.21	0.53	0.19
3	0.58	0.55	0.52	0.49
4	0.70	0.51	0.70	0.53
5	0.72	0.61	0.75	0.72
6	0.85	0.44	0.92	0.69
7	0.84	0.97	0.75	0.56
8	0.77	0.64	0.79	0.39
9	0.50	0.49	0.43	0.54
10	0.15	0.15	0.13	0.06
11	0.00	0.00	0.00	0.00
MAPE		12.22%	18.33%	20.95%
MAE		0.09	0.06	0.11
R-RMSE		15.05%	10.40%	16.49%

La Tabla 27 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.59 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.51 m/s a 20 m, 0.61 m/s a 30 m y 0.46 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores adyacentes entre ambos métodos. La Figura 70 muestra el perfil de la distribución de velocidades.

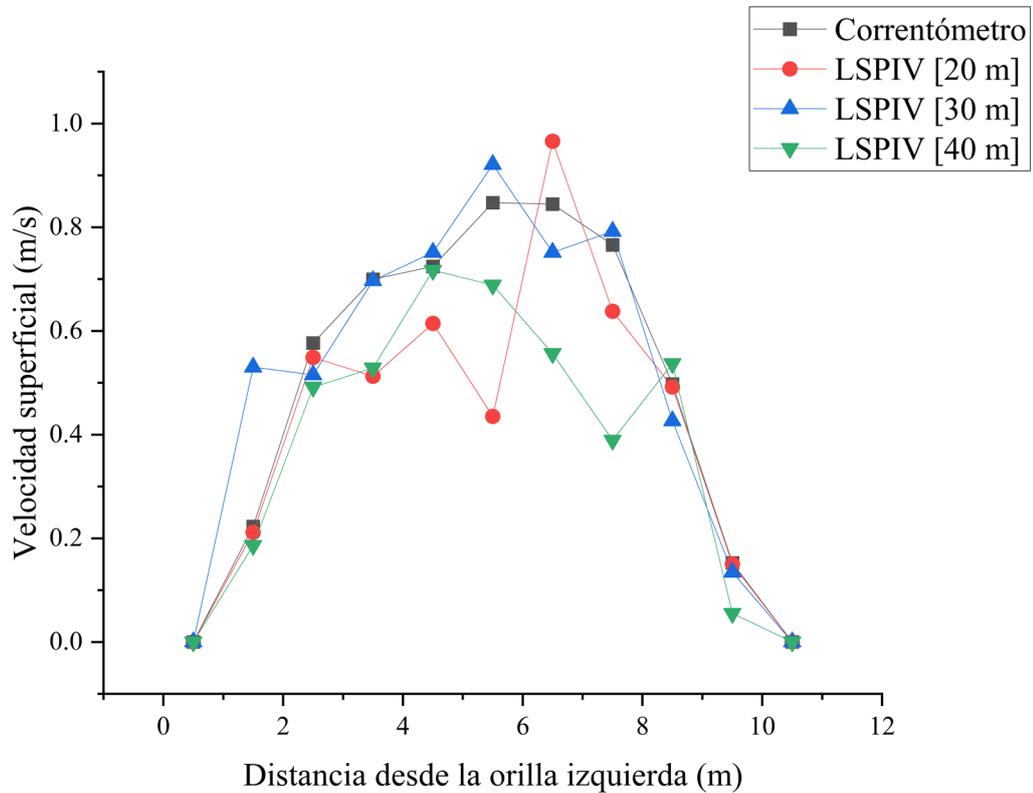
**Tabla 27**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 03 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 18-12-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.59
LSPIV [20 m]	0.51
LSPIV [30 m]	0.61
LSPIV [40 m]	0.46

**Figura 70**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 03 medido el 18-12-23.*



#### 4.3.4. Resultados de la medición del 19 de diciembre de 2023

La Tabla 28 sintetiza el análisis del error estadístico entre la comparación de las mediciones obtenidas con correntómetro y LSPIV a diferentes altitudes. En que el método LSPIV es más preciso a distancias más cortas (20 m) y su precisión disminuye a medida que la distancia aumenta (30 m y 40 m).

**Tabla 28**

*Error estadístico de las mediciones de velocidad superficial con correntómetro y LSPIV en la sección 04 medido el 19-12-23.*

<b>Punto</b>	<b>Correntómetro (m/s)</b>	<b>LSPIV [20 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [30 m] (m/s)</b>	<b>LSPIV [40 m] (m/s)</b>
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.26	0.26	0.11	0.44
3	0.44	0.40	0.27	0.68
4	0.59	0.42	0.34	0.74
5	0.66	0.41	0.63	0.63
6	0.69	0.56	0.61	0.70
7	0.77	0.54	0.51	0.63
8	0.72	0.63	0.68	0.49
9	0.65	0.49	0.51	0.51
10	0.58	0.51	0.38	0.53
11	0.47	0.43	0.37	0.59
12	0.19	0.20	0.19	0.14
13	0.24	0.22	0.21	0.12
MAPE		15.17%	21.96%	26.26%
MAE		0.09	0.11	0.11
R-RMSE		12.38%	14.16%	13.68%

La Tabla 29 presenta la velocidad superficial obtenida mediante el método del correntómetro, con un valor de 0.48 m/s, y el método LSPIV a diferentes alturas: 0.39 m/s a 20 m, 0.37 m/s a 30 m y 0.48 m/s a 40 m. Los resultados muestran valores semejantes entre ambos métodos. La Figura 71 muestra el perfil de la distribución de velocidades.

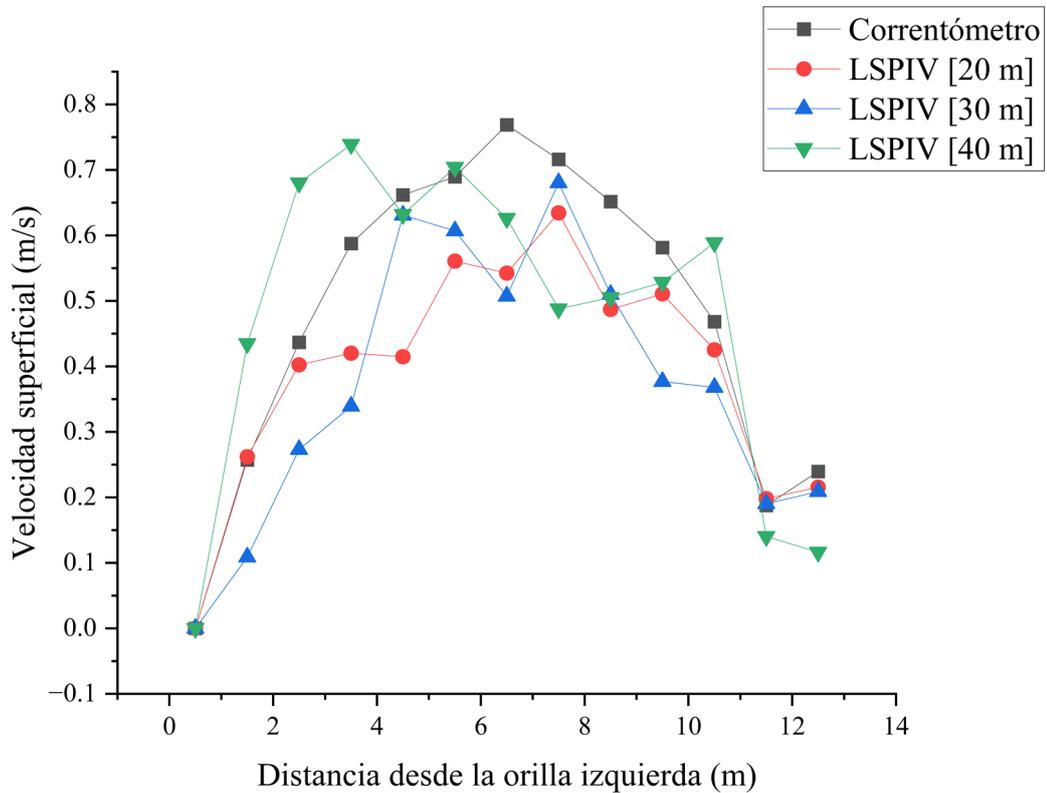
**Tabla 29**

*Velocidades promedio del río chonta en la sección 04 con el método del correntómetro y LSPIV medido el 19-12-23.*

<b>Método</b>	<b>Velocidad promedio (m/s)</b>
Correntómetro	0.48
LSPIV [20 m]	0.39
LSPIV [30 m]	0.37
LSPIV [40 m]	0.48

**Figura 71**

*Comparación de las velocidades superficiales medidas por el LSPIV y el correntómetro en la sección 04 medido el 19-12-23.*



Se aplicaron modelos de distribución a los conjuntos de datos de Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE), Error Absoluto Medio (MAE) y Raíz del Error Cuadrático Medio Relativo (R-RMSE) utilizando el software Hidroesta 2. Para cada conjunto de datos, se seleccionó la distribución que mejor se ajustó a los datos según su valor teórico: la función Gumbel para MAPE, Gamma de 3 parámetros para MAE y Gamma de 2 parámetros para R-RMSE.

**Tabla 30**

*Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Error Medio Absoluto Porcentual (MAPE).*

<b>Distribución</b>	<b><math>\Delta</math> Teórico</b>
Normal	0.15690
Log Normal 2 Parámetros	0.15770
Log Normal 3 Parámetros	0.14430
Gamma 2 Parámetros	0.14430
Gamma 3 Parámetros	0.14788
Log Pearson Tipo III	-
Gumbel	0.14130
Distribución Log Gumbel	0.19820

*Nota.* Como el  $\Delta$  tabular es 0.2367 y la función de distribución Gumbel tiene menor  $\Delta$  que es 0.14130 es la función que más se ajusta a nuestros datos.

**Tabla 31**

*Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Error Medio Absoluto (MAE).*

<b>Distribución</b>	<b><math>\Delta</math> Teórico</b>
Normal	0.14140
Log Normal 2 Parámetros	0.16060
Log Normal 3 Parámetros	0.13670
Gamma 2 Parámetros	0.13360
Gamma 3 Parámetros	0.12601
Log Pearson Tipo III	-
Gumbel	0.14550
Distribución Log Gumbel	0.20730

*Nota.* Como el  $\Delta$  tabular es 0.2367 y la función de distribución Gamma 3 Parámetros tiene menor  $\Delta$  que es 0.12601 es la función que más se ajusta a nuestros datos.

**Tabla 32**

*Modelos de distribución estadística aplicado al conjunto de datos de Raíz del Error Cuadrático Medio Relativo (R-RMSE).*

<b>Distribución</b>	<b><math>\Delta</math> Teórico</b>
Normal	0.20630
Log Normal 2 Parámetros	0.16060
Log Normal 3 Parámetros	0.14820
Gamma 2 Parámetros	0.12280
Gamma 3 Parámetros	0.17470
Log Pearson Tipo III	-
Gumbel	0.17000
Distribución Log Gumbel	0.20730

*Nota.* Como el  $\Delta$  tabular es 0.2367 y la función de distribución Gamma 2 Parámetros tiene menor  $\Delta$  que es 0.12601 es la función que más se ajusta a nuestros datos.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El proceso de medición de la velocidad superficial del río Chonta fue cuidadosamente analizado, donde se identificó que el arrastre de sedimentos, como la descarga de aguas residuales, así como también las horas de sol afectan la precisión de las mediciones, tales como las condiciones.
- Las mediciones realizadas con correntómetro proporcionaron las siguientes velocidades superficiales en cuatro puntos específicos del río Chonta: durante la primera campaña de medición, se registraron valores de 0.58 m/s, 0.632 m/s, 0.48 m/s y 0.180 m/s. En la segunda campaña, las velocidades medidas fueron de 0.65 m/s, 0.80 m/s, 0.49 m/s y 0.233 m/s. En la tercera campaña, se obtuvieron velocidades de 0.716 m/s, 0.81 m/s, 0.59 m/s y 0.48 m/s. Estos resultados sirvieron de medida base para la comparación con la técnica de Velocimetría por Imagen de Partículas a Gran Escala (LSPIV).
- La técnica LSPIV arrojó las siguientes velocidades superficiales promedio durante tres campañas de medición, con vuelos a 20, 30 y 40 metros de altura: en la primera campaña, las velocidades en la primera sección fueron de 0.55, 0.50 y 0.48 m/s; en la segunda sección, 0.626, 0.528 y 0.532 m/s; en la tercera sección, 0.43, 0.45 y 0.37 m/s; y en la cuarta sección, 0.194 m/s, medida solo a 40 metros. En la segunda campaña de medición, las velocidades en la primera sección fueron de 0.58, 0.53 y 0.51 m/s; en la segunda sección, 0.8, 0.79 y 0.84 m/s; en la tercera sección, 0.50, 0.56 y 0.59 m/s; y en la cuarta sección, 0.50, 0.56 y 0.59 m/s. En la tercera campaña de medición, las velocidades en la primera sección fueron de 0.724, 0.693 y 0.668 m/s; en la segunda sección, 0.77, 0.82 y 0.97 m/s; en la tercera sección, 0.51, 0.61 y 0.46 m/s; y en la cuarta sección, 0.39, 0.37 y 0.48 m/s.
- Al comparar los resultados obtenidos con ambos métodos, se observó que la técnica LSPIV proporcionó una precisión significativamente mayor en todas las distancias evaluadas. Para mediciones a 20 metros, el porcentaje de error medio absoluto (MAPE) se encontró entre el 5% y el 20%, el error medio absoluto (MAE) osciló entre 0.03 y 0.21, y el error R-RMSE estuvo comprendido entre el 4% y el 16%. A una distancia de 30 metros, el MAPE varió entre el 5% y el 25%, el MAE entre 0.05 y 0.19, y el R-RMSE entre el 5% y el 20%. Para mediciones a 40 metros, el MAPE estuvo entre el 5% y el 30%, el MAE entre 0.03 y 0.23,

y el R-RMSE entre el 10% y el 35%. Observando que a menor altitud tenemos mejores resultados debido a que el error disminuye.

## 5.2. Recomendaciones

- Si hay mucho transporte de sedimentos en el río, se recomienda cambiar el color del trazador utilizado para garantizar la visibilidad durante la grabación de vídeo. Los sedimentos dificultan la detección de los trazadores.
- Se recomienda grabar los videos a baja altura, específicamente a unos 20 metros, ya que la técnica LSPIV proporciona mejores resultados en las campañas de campo. Esta altura aumenta la resolución y la precisión de las mediciones de la velocidad superficial.
- Para determinar el caudal de un río, es fundamental contar con una sección típica y medir la velocidad media en dicha sección. Se sugiere que el área seleccionada sea representativa de las características del río. Por ello, se recomienda instalar estaciones de medición debajo de puentes, ya que las secciones en estas ubicaciones tienden a ser rectangulares y más uniformes, lo cual facilita el análisis y mejora la precisión de las estimaciones.
- La luz natural tiene un impacto significativo en la calidad de los datos obtenidos con LSPIV. Se recomienda realizar las mediciones de los datos por la mañana, ya que el reflejo del sol en el agua puede actuar como trazador natural y mejorar el rendimiento de la técnica. Sin embargo, evitar la toma de datos durante el día, ya que el brillo intenso del sol provoca reflejos que afecta la visibilidad y a la precisión de la medición.
- La metodología LSPIV es apropiada para velocidades superficiales elevadas en condiciones de máximas avenidas, ya que el operador de métodos tradicionales está expuesto a accidentes. Sin embargo, para garantizar velocidades precisas, se recomiendan definir previamente los puntos de control y que sean visibles ante eventos máximos.
- Es recomendable establecer claramente los puntos de control antes de realizar mediciones LSPIV. Estos puntos de control son importantes para corregir y validar los datos obtenidos para garantizar la exactitud de los resultados, proceso denominado ortorectificación.

## CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### BIBLIOGRAFÍA

- Apaella, R. (2014). Hidráulica fluvial (1a ed.). Fondo Editorial - UNALM.
- Arboleda J.; Felipe O.; Yerrén J. – DHI/SPH (2018). *Manual de Hidrometría Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)*. Dirección de Hidrología (DHI), Subdirección de Predicción Hidrológica (SPH).
- Bolatti, L. F. (2019). *Medición de caudales mediante velocimetría de partículas a gran escala (LSPIV)* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Córdoba.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana
- Chuvieco, E., & Salinero, E. C. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (3a ed.). Ediciones Rialp.
- Consorcio Salzgitter-Sisa (2010). *Estudio de factibilidad – Presa Chonta Proyecto de regulación de las aguas del río Chonta mediante la Presa Chonta*.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3a ed.). Waveland press.
- Fakhri, A. (2021). *Application of large-scale particle image velocimetry to entrance flows* [Thesis of master]. Colorado State University.
- Gonzales, M. y García, D. (2001). *Restauración de Ríos y Riberas*. Editorial Aedos.
- Guillén, N. F. (2019). *Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de Córdoba.
- Herschy, R.W. (2009). *Streamflow Measurement* (3a ed.). CRC Press.
- Jha, A. R. (2016). *Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles* (1a ed.). CRC Press.
- Lobo, P. (2019). *Implementación de la técnica experimental de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la provincia de Catamarca* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional del Litoral.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de hidrología hidráulica y drenaje*.

- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (2a ed.). Escuela Col. de Ingeniería.
- Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). *Fundamentals of Ocean Renewable energy: Generating Electricity from the Sea* (1a ed). Academic Press.
- Organización Meteorológica Mundial. (2020). Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología – De la medición a la información hidrológica: Vol. I.
- Ortega, D. (2012). *Hidrometría básica: Aplicada a la Operación de Distritos y Unidades de Riego*. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.
- Patalano, A. (2017). *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de Córdoba.
- Ribeiro, F. (2021). *Metodologia de campo baseada em imagens para determinar o potencial hidrocínético fluvial* [Tesis de maestría]. Universidade de Brasília.
- Rosas, F., & Tejeda, S. (2020). *Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana Unión.
- Santamaría J. & Sanz T. (2011). *Fundamentos de Fotogrametría*. Universidad de La Rioja
- Sharif, O. (2022) *Measuring surface water flow velocities by a drone and large-scale particle image velocimetry (LSPIV)*. Universidad de Twente.
- Tamari, S. (2011). *Evaluación de la técnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial del agua en obras hidráulicas* [Tesis de maestría]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- WMO. (2012). *International glossary of hydrology = Glossaire international d'hydrologie = Glosario hidrologico internacional*. Geneva WMO.

## LINKOGRAFÍA

- Botelli, M., Guillén, N., García, C., Patalano, A., Chalabe, M. (2020). Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica. Cuadernos de Ingeniería. Nueva serie, (12), p. 21-38. Recuperado de [http://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac\\_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id\\_notice=68760](http://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id_notice=68760)

- Chang, K., Tseng, C., Tseng, C., Liao, T., & Yang, C. (2020). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments. *Applied Sciences*, 10(17), 6102. <https://doi.org/10.3390/app10176102>
- Estabridis, Z. (2022). *Red internacional de socios locales y académicos de la iMHEA se reunieron en Cusco para compartir avances y desafíos del monitoreo hidrológico en la región andina*. CONDESAN. <https://condesan.org/2019/02/06/red-internacional-socios-locales-academicos-la-imhea-se-reunieron-cusco-compartir-avances-desafios-del-monitoreo-hidrologico-la-region-andina/>
- Flores, A. F. (2018). *Hidrometría* [Tesis de pregrado]. Universidad José Carlos Mariátegui. Far-Infrared Camera. *Water*, 9(4), 269. <https://doi.org/10.3390/w9040269>
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397–414. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>
- Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 40, 06015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>
- Huang, W. C., Young, C. C., & Liu, W. C. (2018). Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan. *Water*, 10(3), 280. <https://doi.org/10.3390/w10030280>
- Ishizawa, Y. B. (2022). *Aplicação de velocimetria por imagem de partículas em larga escala (LSPIV) para medição de vazão em canal aberto utilizando plataforma 'open source'* (Dissertação (Mestrado)). Universidade de São Paulo, São Carlos. Recuperado de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30112022-173306/>
- Jolley, M. J., Russell, A. J., Quinn, P., & Perks, M. (2021). Considerations when applying Large-Scale PIV and PTV for determining river flow velocity. *Frontiers in water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.709269>
- Legleiter, C. J., & Kinzel, P. J. (2020). Inferring Surface Flow Velocities in Sediment-Laden Alaskan Rivers from Optical Image Sequences Acquired from a Helicopter. *Remote Sensing*, 12(8), 1282. <https://doi.org/10.3390/rs12081282>

- Lin, Y. C., Ho, H. C., Lee, T. A., & Chen, H. Y. (2022). Application of Image Technique to Obtain Surface Velocity and Bed Elevation in Open-Channel Flow. *Water*, 14(12), 1895. <https://doi.org/10.3390/w14121895>
- Liu, W. C., Huang, W. C., & Young, C. C. (2022). Uncertainty Analysis for Image-Based Streamflow Measurement: The Influence of Ground Control Points. *Water*, 15(1), 123. <https://doi.org/10.3390/w15010123>
- Liu, W. C., Lu, C. H., & Huang, W. C. (2021). Large-Scale Particle Image Velocimetry to Measure Streamflow from Videos Recorded from Unmanned Aerial Vehicle and Fixed Imaging System. *Remote Sensing*, 13(14), 2661. <https://doi.org/10.3390/rs13142661>
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(4). <https://doi.org/10.1029/2008wr006950>
- Nippon Koei Co. Ltd. (NK). (2010). Plan de gestión de los recursos hídricos en las cuencas Mashcón y Chonta con énfasis en el afianzamiento hídrico de las subcuencas Azufre, Paccha y río Grande de Chonta, Cajamarca, Perú: estudio de afianzamiento hídrico de las subcuencas Paccha, Azufre y Grande de Chonta. En Autoridad Nacional Del Agua. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4387>
- Perks, M. T., Sasso, S. F. D., Hauet, A., Jamieson, E. R., Coz, J. L., Pearce, S., Peña-Haro, S., Pizarro, A., Strelnikova, D., Tauro, F., Bomhof, J., Grimaldi, S., Goulet, A., Hortobágyi, B., Jodeau, M., Käfer, S., Ljubičić, R., Maddock, I., Mayr, P., ... Manfreda, S. (2020). Towards harmonisation of image velocimetry techniques for river surface velocity observations. *Earth System Science Data*, 12(3), 1545–1559. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1545-2020>
- Pumo, D., Alongi, F., Ciraolo, G., & Noto, L. (2021). Optical Methods for River Monitoring: A Simulation-Based Approach to Explore Optimal Experimental Setup for LSPIV. *Water*, 13(3), 247. <https://doi.org/10.3390/w13030247>
- Rosas, F., Tejeda, S., & Canaza, F. (2021). Estimación del caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala aplicado en flujo a superficie libre. *Gaceta Técnica*, 22(1). <https://www.redalyc.org/journal/5703/570365587001/html/>

- Santillán, M., Rivero, E. D. (2020). *Estudio análisis y verificación del canal constitución mediante implementación de la técnica LSPIV*. Universidad Católica de Salta. Facultad de Ingeniería.  
[http://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac\\_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id\\_notice=69802](http://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id_notice=69802)
- Sciacchitano, A. (2019). Uncertainty quantification in particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 30(9), 092001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab1db8>
- Support for DJI air 2S. (s/f). DJI [en línea]. Recuperado de:  
<https://www.dji.com/global/support/product/air-2s>
- Support for Phantom 4 Pro. (s/f). DJI [en línea]. Recuperado de:  
<https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>
- Tauro, F., Pagano, C. C., Phamduy, P., Grimaldi, S., & Porfiri, M. (2015). Large-Scale Particle Image Velocimetry from an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 20(6), 3269–3275.  
<https://doi.org/10.1109/tmech.2015.2408112>
- Turnipseed, D. P., & Sauer, V. B. (2010). Discharge measurements at gaging stations. *Techniques and Methods*. <https://doi.org/10.3133/tm3a8>
- Thielicke, W., & Sonntag, R. (2021). Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software*, 9(1), 12. DOI: <https://doi.org/10.5334/jors.334>
- Xylem Australia. (2020). Xylem Water Solutions & Water Technology | Xylem US.  
<https://www.xylem.com/en-au/products--services/analytical-instruments-and-equipment/flowmeters-velocimeters/flow-probe/>
- Zhang, E., Li, L., Huang, W., Jia, Y., Zhang, M., Kang, F., & Da, H. (2023). Measuring velocity and discharge of high turbidity rivers using an improved Near-Field Remote-Sensing measurement system. *Water*, 16(1), 135. <https://doi.org/10.3390/w16010135>



Puntos de control		Información de la sección transversal	
Descripción general: (Tenga en cuenta un mínimo de cuatro (4) puntos de control, se requieren dos (2) en		Batimetría de una sección transversal a la vista del vídeo necesaria para calcular Q	
A	:	¿Se mide la sección transversal?	S/N
B	:	Método (ADCP, cinta/peso, levantamie:	
C	:	¿Está disponible la clasificación por zona S/N	#Clasificación
D	:	Notas	
E	:		
F	:		

Distancias de puntos de control				Información de control de calidad	
Método de medición (cinta de acero/tejido, : levantamiento, etc.)				Calificación de calidad de la medición de : comparación (E, G, F, P,	
Punto	Punto	Distancia	Comentarios	Comp.	
				Método de : medición	
				Hora de inicio : _____	Hora final : _____
				Caudal : _____ ft <sup>3</sup> /sec	m <sup>3</sup> /sec
				Stage : _____ ft	m
				Área de la sec. transversal : _____ ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
				Ancho : _____ ft	m
				Profundidad máxima : _____ ft	m
				Velocidad media : _____ ft/s	m/s
Utilice este espacio para introducir las distancias entre los puntos de control, incluidos los segmentos de línea					

Otros comentarios

## Anexo B: Secciones de la primera campaña de medición

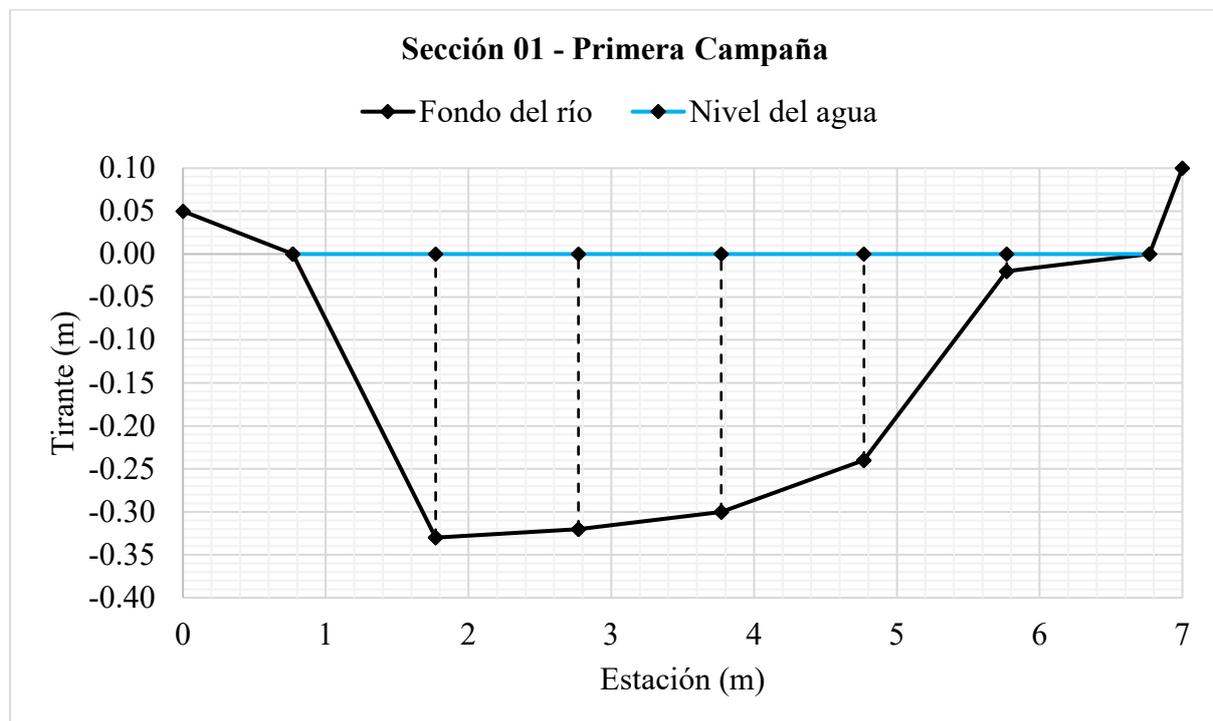
**Tabla 33**

*Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la primera campaña de medición, 14 de octubre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0.00
1	-0.33
2	-0.32
3	-0.30
4	-0.24
5	-0.02
6	0.00

**Figura 72**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la primera campaña de medición, 14 de octubre de 2023.*



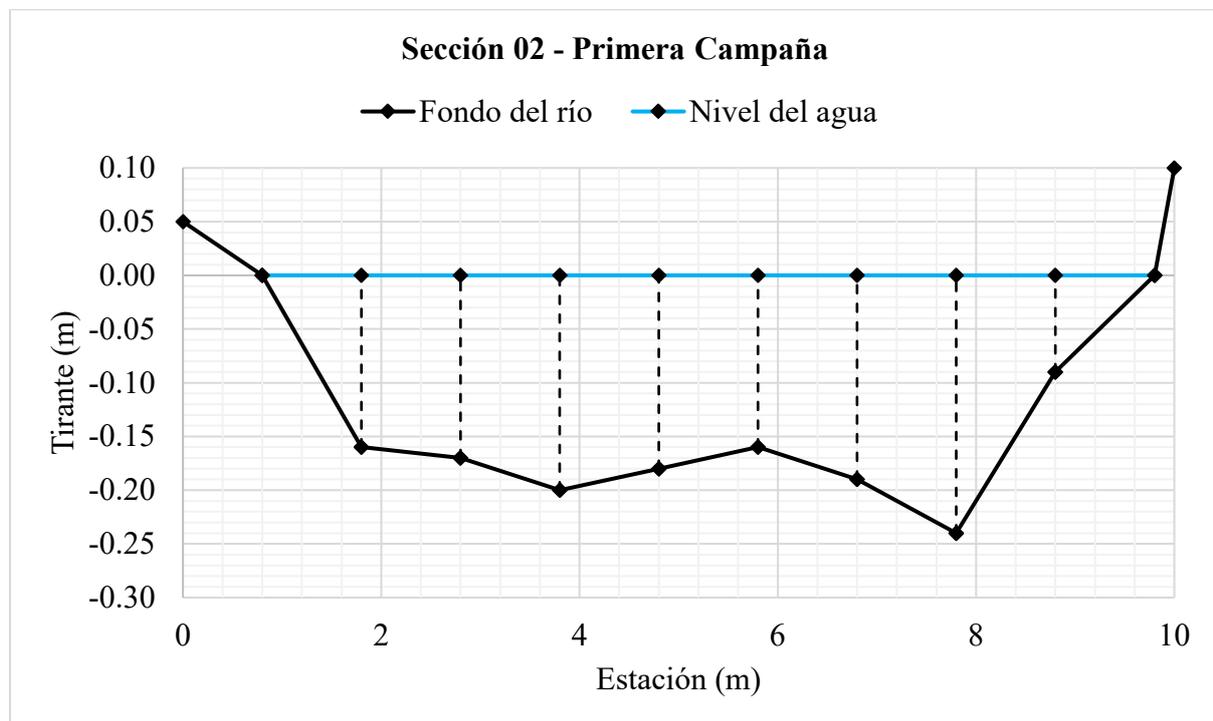
**Tabla 34**

*Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la primera campaña de medición, 15 de octubre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0.00
1	-0.16
2	-0.17
3	-0.20
4	-0.18
5	-0.16
6	-0.19
7	-0.24
8	-0.09
9	0.00

**Figura 73**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la primera campaña de medición, 15 de octubre de 2023.*



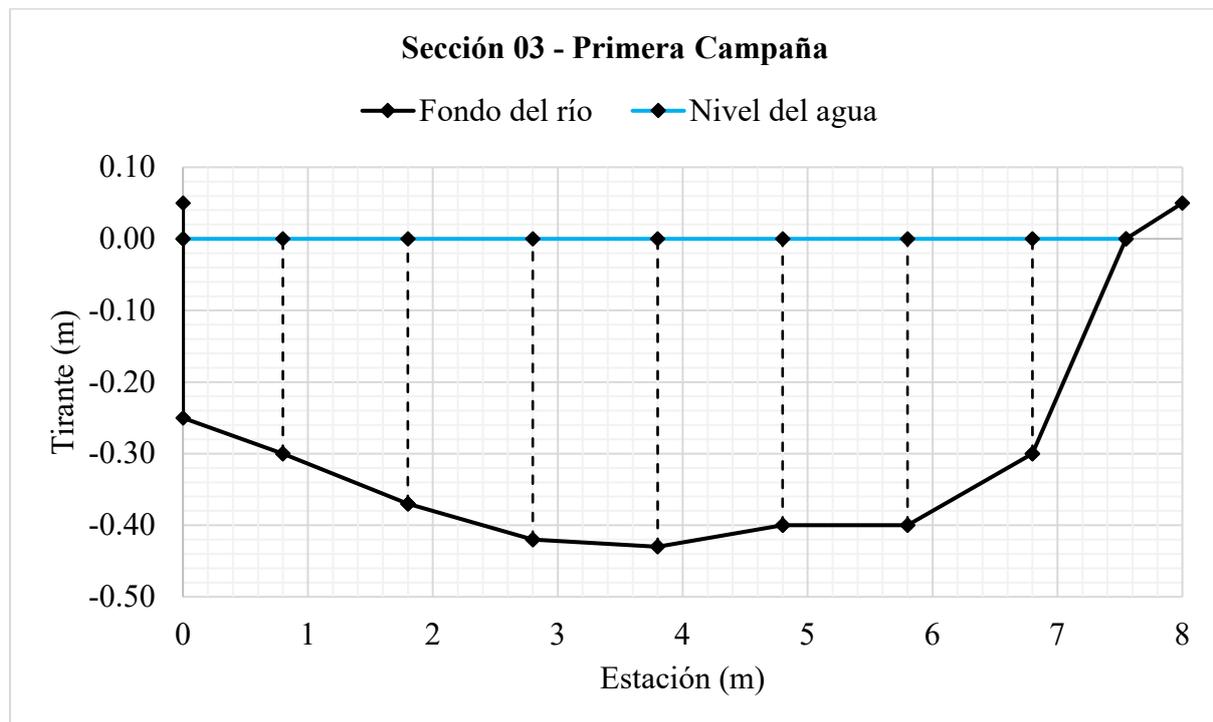
**Tabla 35**

*Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la primera campaña de medición, 16 de octubre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	-0.25
0.8	-0.3
1.8	-0.37
2.8	-0.42
3.8	-0.43
4.8	-0.40
5.8	-0.40
6.8	-0.30
7.55	0.00

**Figura 74**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la primera campaña de medición, 16 de octubre de 2023.*



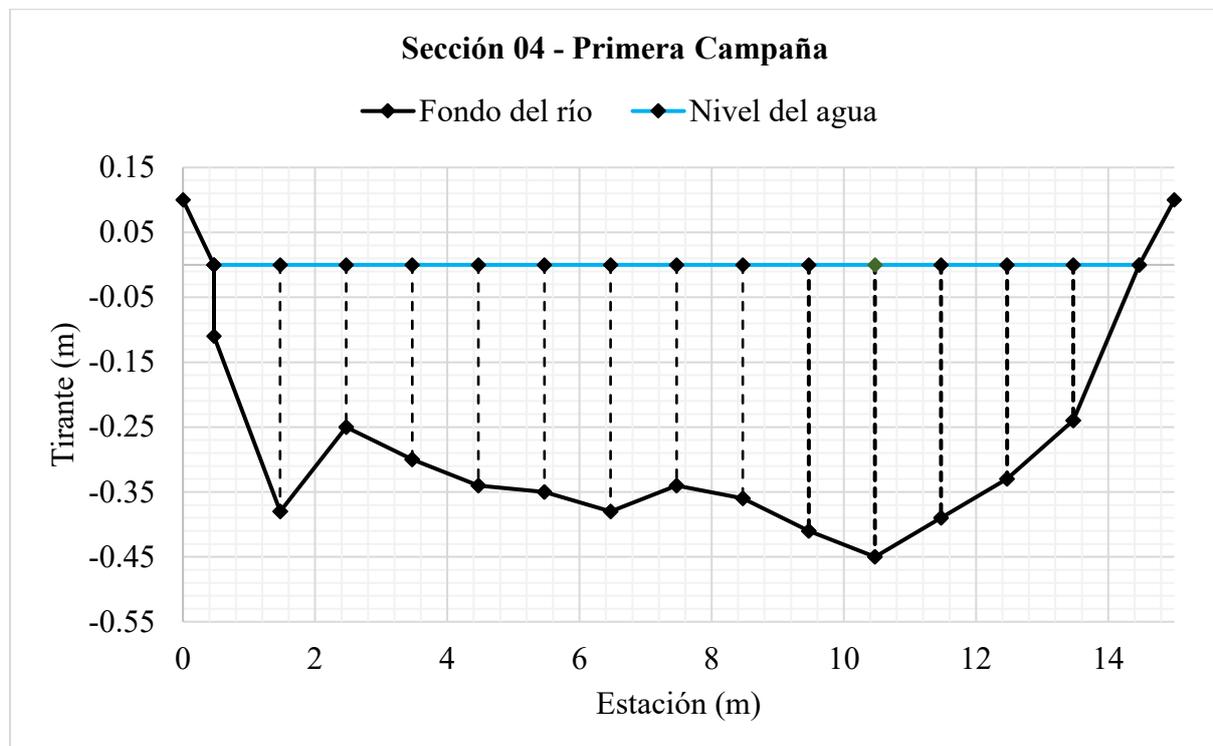
**Tabla 36**

*Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la primera campaña de medición, 17 de octubre de 2023.*

<b>Estación (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>
0	-0.11
1	-0.38
2	-0.25
3	-0.3
4	-0.34
5	-0.35
6	-0.38
7	-0.34
8	-0.36
9	-0.41
10	-0.45
11	-0.39
12	-0.33
13	-0.24
14	0

**Figura 75**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la primera campaña de medición, 17 de octubre de 2023.*



## Anexo C: Secciones de la segunda campaña de medición

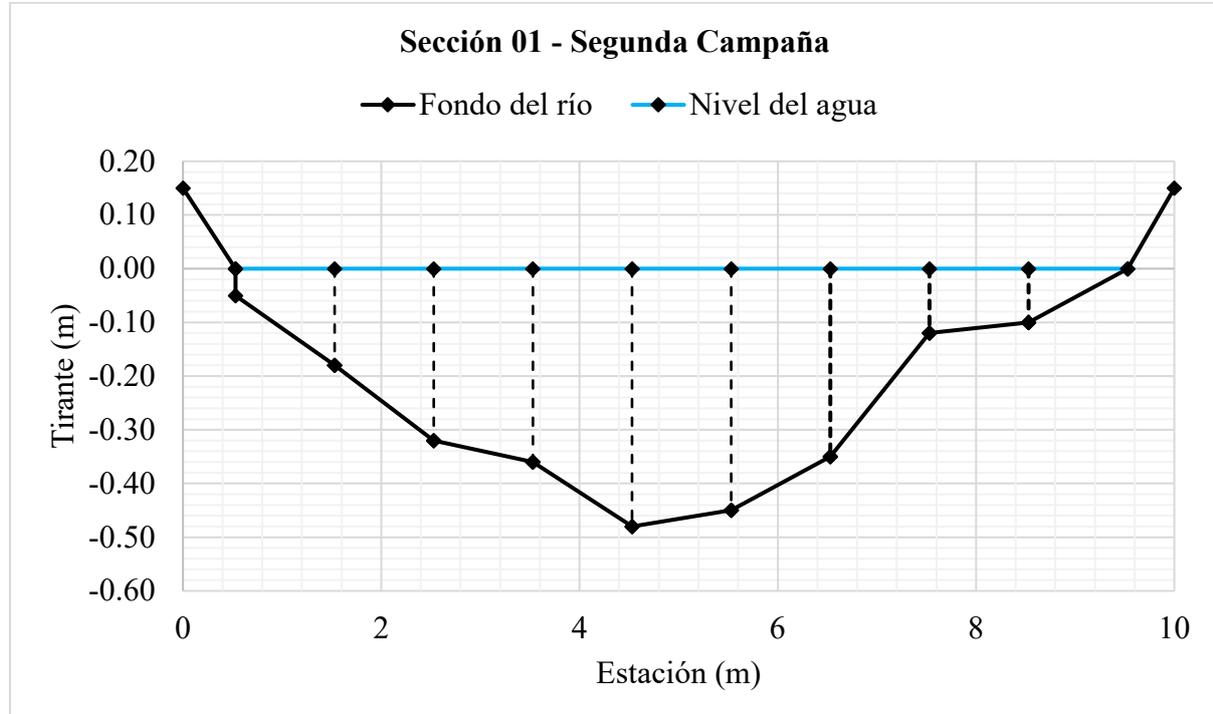
**Tabla 37**

*Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la segunda campaña de medición, 11 de noviembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	-0.05
1	-0.18
2	-0.32
3	-0.36
4	-0.48
5	-0.45
6	-0.35
7	-0.12
8	-0.1
9	0

**Figura 76**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la segunda campaña de medición, 11 de noviembre de 2023.*



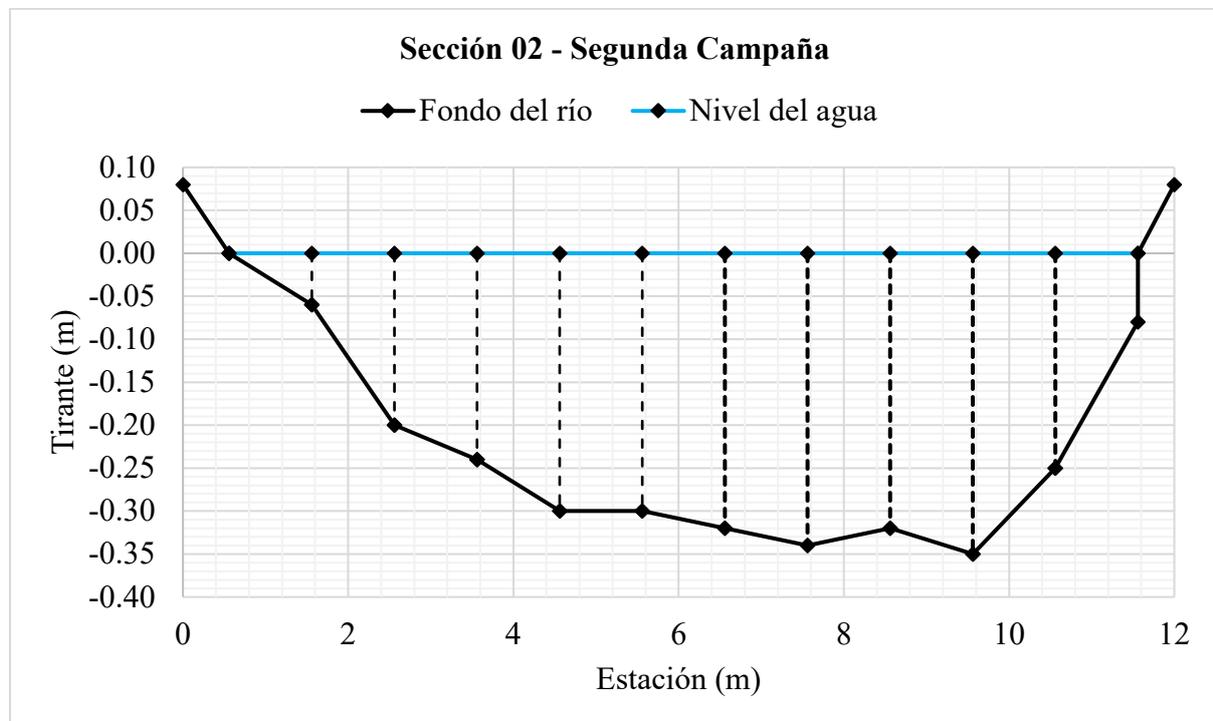
**Tabla 38**

*Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la segunda campaña de medición, 12 de noviembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0
1	-0.06
2	-0.2
3	-0.24
4	-0.3
5	-0.3
6	-0.32
7	-0.34
8	-0.32
9	-0.35
10	-0.25
11	-0.08

**Figura 77**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la segunda campaña de medición, 12 de noviembre de 2023.*



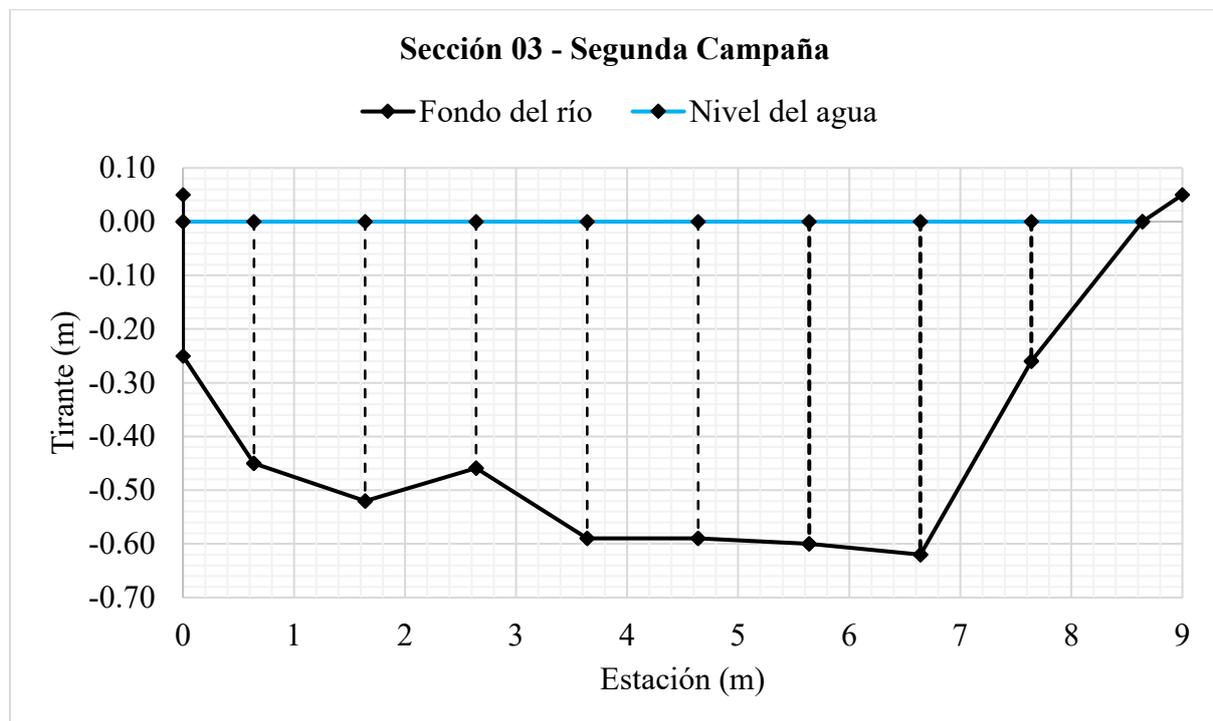
**Tabla 39**

*Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la segunda campaña de medición, 13 de noviembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	-0.25
0.64	-0.45
1.64	-0.52
2.64	-0.459
3.64	-0.59
4.64	-0.59
5.64	-0.6
6.64	-0.62
7.64	-0.26
8.64	0

**Figura 78**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la segunda campaña de medición, 13 de noviembre de 2023.*



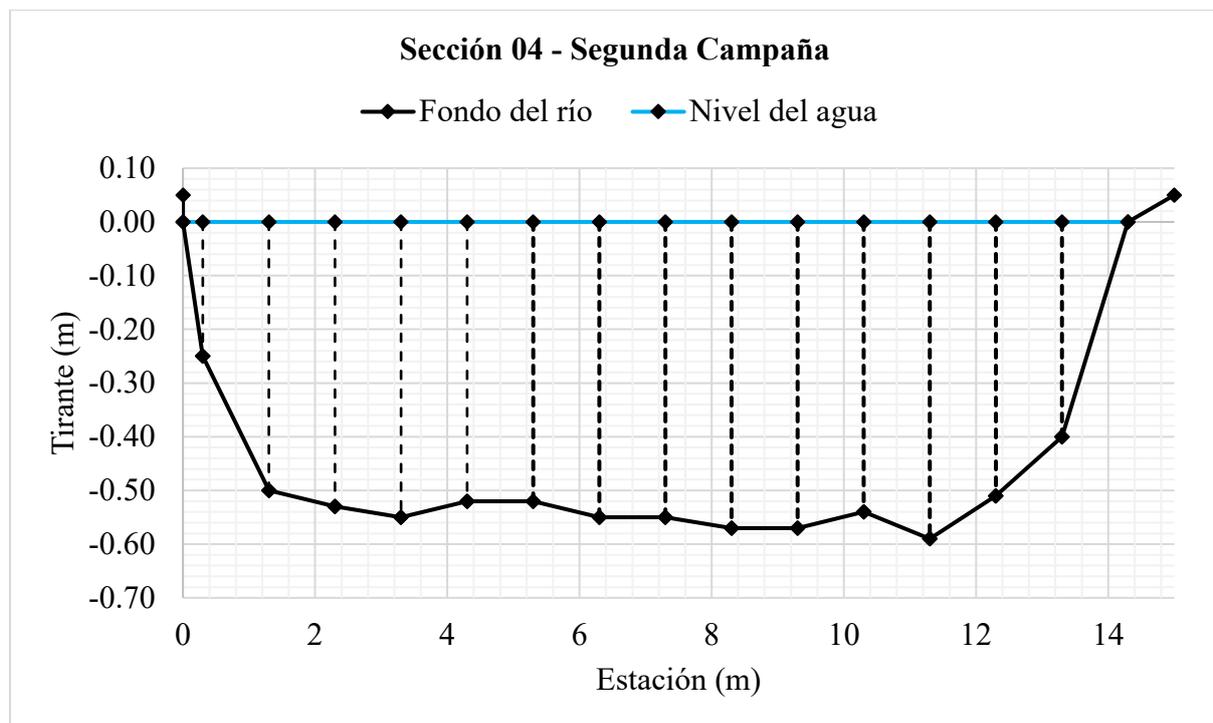
**Tabla 40**

*Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la segunda campaña de medición, 14 de noviembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0
0.3	-0.25
1.3	-0.5
2.3	-0.53
3.3	-0.55
4.3	-0.52
5.3	-0.52
6.3	-0.55
7.3	-0.55
8.3	-0.57
9.3	-0.57
10.3	-0.54
11.3	-0.59
12.3	-0.51
13.3	-0.4
14.3	0

**Figura 79**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la segunda campaña de medición, 14 de noviembre de 2023.*



## Anexo D: Secciones de la tercera campaña de medición

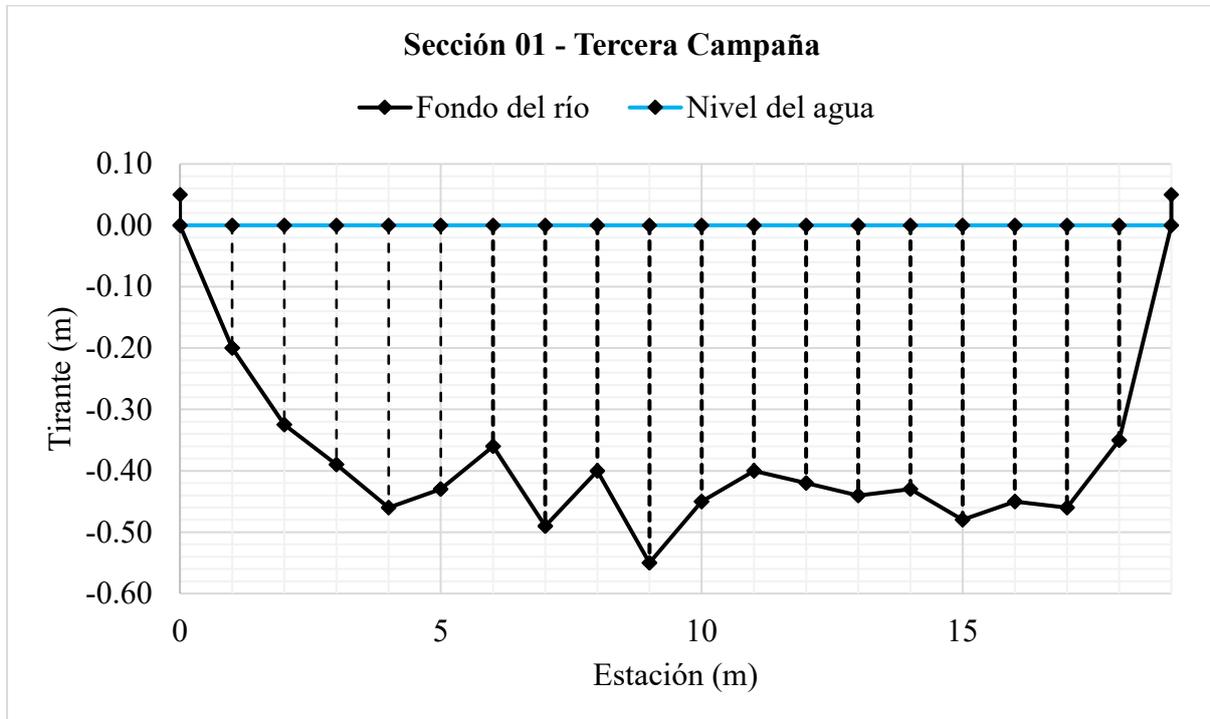
**Tabla 41**

*Distribución de los tirantes de la sección 01 del cauce en la tercera campaña de medición, 16 de diciembre de 2023.*

<b>Estación (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>
0	0
1	-0.2
2	-0.325
3	-0.39
4	-0.46
5	-0.43
6	-0.36
7	-0.49
8	-0.4
9	-0.55
10	-0.45
11	-0.4
12	-0.42
13	-0.44
14	-0.43
15	-0.48
16	-0.45
17	-0.46
18	-0.35
19	0

**Figura 80**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 01 de la tercera campaña de medición, 16 de diciembre de 2023.*



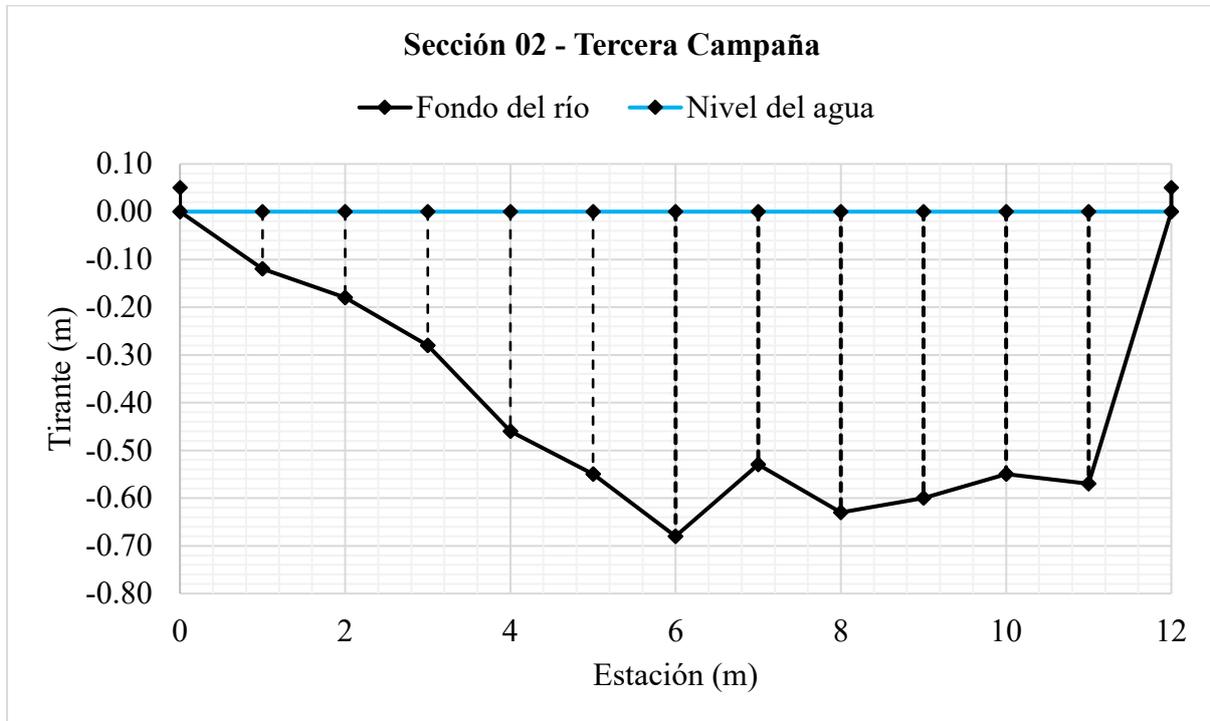
**Tabla 42**

*Distribución de los tirantes de la sección 02 del cauce en la tercera campaña de medición, 17 de diciembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0
1	-0.12
2	-0.18
3	-0.28
4	-0.46
5	-0.55
6	-0.68
7	-0.53
8	-0.63
9	-0.6
10	-0.55
11	-0.57

**Figura 81**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 02 de la tercera campaña de medición, 17 de diciembre de 2023.*



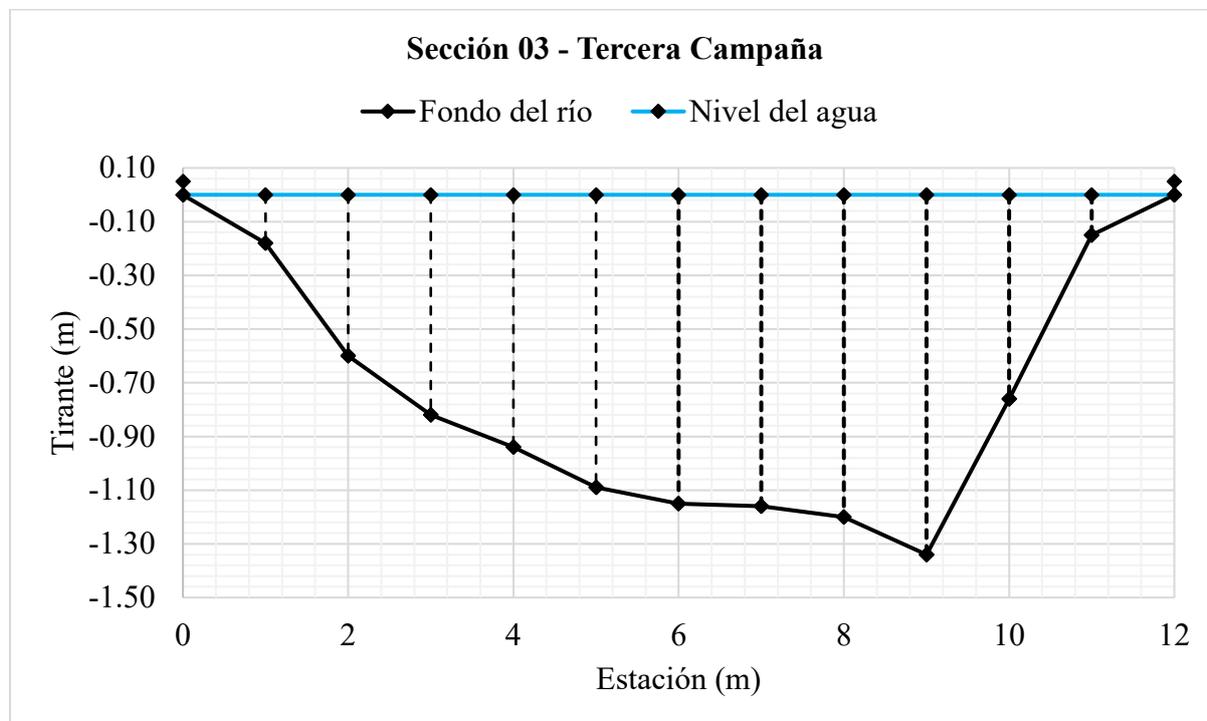
**Tabla 43**

*Distribución de los tirantes de la sección 03 del cauce en la tercera campaña de medición, 18 de diciembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0
1	-0.18
2	-0.6
3	-0.82
4	-0.94
5	-1.09
6	-1.15
7	-1.16
8	-1.2
9	-1.34
10	-0.76
11	-0.15
12	0

**Figura 82**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 03 de la tercera campaña de medición, 18 de diciembre de 2023.*



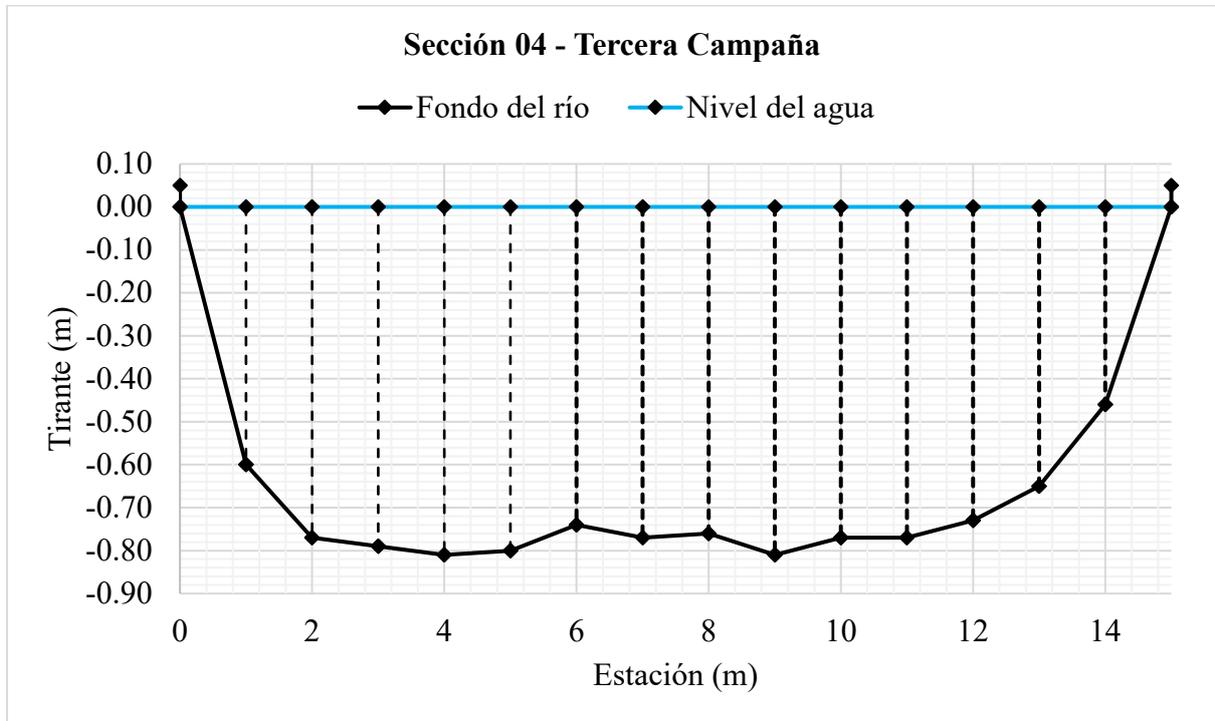
**Tabla 44**

*Distribución de los tirantes de la sección 04 del cauce en la tercera campaña de medición, 19 de diciembre de 2023.*

Estación (m)	Tirante (m)
0	0
1	-0.6
2	-0.77
3	-0.79
4	-0.81
5	-0.8
6	-0.74
7	-0.77
8	-0.76
9	-0.81
10	-0.77
11	-0.77
12	-0.73
13	-0.65
14	-0.46
15	0

**Figura 83**

*Perfil transversal del cauce y nivel del agua en la sección 04 de la tercera campaña de medición, 19 de diciembre de 2023.*



## Anexo E: Panel fotográfico

### Figura 84

*Medición de la velocidad utilizando correntómetro PASCO PS-2130 en la sección 02 de la primera campaña de medición con coordenadas E: 779767.000, N: 9207722.000 del río Chonta.*



### Figura 85

*Instalación de la base RTK para la medición topográfica de los puntos de control.*



**Figura 86**

*Sembrado de trazadores en la primera campaña de medición.*



**Figura 87**

*Sembrado de trazadores en la tercera campaña de medición.*



**Figura 88**

*Estacionamiento de Drone DJI Phantom 4 RTK para el inicio de la toma de datos para determinar la velocidad superficial del río.*



**Figura 89**

*Marcas de posición aérea para la ortorectificación de las imágenes.*



**Figura 90**

*Grabación de imágenes mediante vuelo drone en la sección 01 de la tercera campaña de medición con coordenadas E: 779731.000, N: 9207437.000 del río Chonta.*



**Figura 91**

*Vista aérea de la sección 01 de la tercera campaña de medición con coordenadas E: 779731.000, N: 9207437.000 del río Chonta.*



**Figura 92**

*Trazadores (aserrín) utilizados para la caracterización del flujo en la técnica de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV)*



**Figura 93**

*Medición de los tirantes de la sección 02 de la primera campaña de medición con coordenadas E: 779767.000, N: 9207722.000 del río Chonta.*

